経済産業省　平成 20 年度技術戦略マップローリング委託事業
（分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ作成支援事業）

分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ

報　告　書

平成２１年３月

横断型基幹科学技術研究団体連合

はじめに

横断型基幹科学技術研究団体連合（略称：横幹連合）は、文理に跨る 42 学会からなる研究団体組織である。縦に細分化されつつある科学技術に対して横の軸の重要性を主張し、各分野で蓄積されつつある知の統合を通じて、社会のイノベーションへとつながる新たな学問の展開を図ることを目的の一つとしている。横幹連合の会員学会の学術分野や研究課題の多くは、人間、社会、人工物、自然などが複雑に関連しており、理工学系や人文社会学系の細分化した個々の領域だけでは取り組むことが困難な状況にあるが、理工学分野と人文社会学分野との交流や連携が未だに遅れており、知の統合をいかに推進するかという課題は横幹連合として取り組むべき大きな目標である。

この活動の一環として、横幹連合では平成１９年度から分野・学会を横断するアカデミック・ロードマップの策定に取り組み、知の統合を進める基盤として何が必要か、それらの基盤整備がどのように進展していくと予想されるか、その結果としての知の統合を社会としてどのように活用できる可能性があるか、等の検討を進めてきた。

幸いにも、平成２０年度の経済産業省技術戦略マップローリング委託事業（アカデミック・ロードマップ作成支援事業）の大きな支援を受けることができ、アカデミック・ロードマップの作成を通して横幹連合としてこれらの課題に取り組むこととなった。今回は、「知の統合」、「社会システムのモデリング・シミュレーション技術」、「人間・生活支援技術」の３つを取り上げた。これらの課題の重要性に関しては、昨年のアカデミック・ロードマップの検討の中でも指摘されている。工学系と人文社会系との連携が不可欠な分野の目標課題でもあり、人文社会科学系の研究者にもご協力をいただくことにした。

なお、これに先立ち、平成１９年度には経済産業省の技術戦略マップローリング委託事業の中で、アカデミック・ロードマップ作成支援事業の支援を受け、「学会横断型アカデミック・ロードマップ報告書」を作成した。この中で、横幹連合が関連する横断型学術分野として、「制御・管理技術分野」、「シミュレーション分野」、「ヒューマンインタフェース分野」、「ものづくり分野」の４つの分野を取り上げ、横幹連合会員学会の中から計測自動制御学会、日本シミュレーション学会、ヒューマンインタフェース学会、精密工学会の４学会にそれぞれ幹事学会をお願いし、他の会員学会の協力連携のもとでアカデミック・ロードマップに関する検討が行われた。今年度の活動はこの成果をベースに視点を拡大し、人間・社会とのかかわりに重点を置いて検討を行った。

本報告書は、各ＷＧの委員の精力的な活動により、最終的な検討結果をまとめたものである。今回の成果は各課題に対してまだ不十分な点も多いが、今後の横幹連合と会員学会の活動はもとより、わが国の将来のイノベーションに少しでも貢献できれば幸いである。

このアカデミック・ロードマップ作成の過程では、経済産業省から多大な支援と多くのご助言をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

平成 21 年 3 月

特定非営利活動法人　横断型基幹科学技術研究団体連合
理事　横幹ロードマップ委員会委員長　佐　野　　昭

委　員　一　覧

統括委員会（横幹ロードマップ委員会）

委員長	：佐野　昭	慶應義塾大学（横幹連合理事)、WG1 主査
副委員長	：出口光一郎	東北大学（横幹連合理事）
幹　事	：神徳徹雄	産業技術総合研究所（横幹連合企画委員会委員）
	井上雄一郎	横幹連合顧問
委　員	：川村貞夫	立命館大学（日本ロボット学会)、WG３主査
	鈴木久敏	筑波大学（横幹連合副会長）
	山崎　憲	日本大学（日本シミュレーション学会、横幹連合理事)、WG２主査
アドバイザリ委員		
	：江尻正員	産業技術コンサルタント（横幹連合前副会長、横幹ロードマップ委員会前委員長）
補助研究員	：富田武彦	横幹連合事務局員
	潮　裕子	横幹連合事務局員

WG１（ワーキンググループ１）

主　査：	佐野　昭	慶應義塾大学（計測自動制御学会）
副主査：	出口光一郎	東北大学（計測自動制御学会）
委　員：	遠藤　薫	学習院大学（日本社会情報学会）
	太田敏澄	電気通信大学（日本社会情報学会）
	小林信一	筑波大学（研究・技術計画学会）
	新　誠一	電気通信大学（計測自動制御学会）
	鈴木久敏	筑波大学（日本経営工学会）
	田中健次	電気通信大学（日本信頼性学会）
	椿　広計	統計数理研究所（応用統計学会）
	長嶋雲兵	産業技術総合研究所（日本コンピュータ化学会）
	原　尚幸	東京大学（応用統計学会）
	藤井眞理子	東京大学（日本オペレーションズ・リサーチ学会）
	宮本定明	筑波大学（日本知能情報ファジィ学会）
	安岡善文	国立環境研究所（日本リモートセンシング学会）
協　力：	高橋　進	東海大学（日本経営システム学会）

WG２（ワーキンググループ２）

主　査：	山崎　憲	日本大学（日本シミュレーション学会）
副主査：	古田一雄	東京大学（ヒューマンインタフェース学会）
幹　事：	大石進一	早稲田大学（日本シミュレーション学会）
委　員：	和泉　潔	産業技術総合研究所（人工知能学会）
	七条達弘	大阪府立大学（日本経済学会）
	辻　竜平	信州大学（数理社会学会）
	寺野隆雄	東京工業大学（計測自動制御学会）
	中西美和	千葉大学（日本人間工学会）
	中谷祐介	早稲田大学（日本シミュレーション学会）
	久本誠一	製品評価技術基盤機構（日本人間工学会）
	増田浩通	千葉工業大学（プロジェクトマネジメント学会）
	宮脇　昇	立命館大学（日本シミュレーション＆ゲーミング学会）
	渡邉一衛	成蹊大学（日本経営工学会）

WG３（ワーキンググループ３）

主　査：	川村貞夫	立命館大学（日本ロボット学会）
副主査：	大倉典子	芝浦工業大学（計測自動制御学会）
幹　事：	稲見昌彦	慶應義塾大学（日本バーチャルリアリティ学会）
委　員：	伊東昌子	常盤大学（プロジェクトマネジメント学会）
	市川　熹	早稲田大学（ヒューマンインタフェース学会）
	加藤俊一	中央大学（日本感性工学会）
	小松原明哲	早稲田大学（日本人間工学会）
	篠田裕之	東京大学（計測自動制御学会）
	武田博直	㈱セガ（日本バーチャルリアリティ学会）
	辻　敏夫	広島大学（日本バイオメカニクス学会）
	持丸正明	産業技術総合研究所（日本人間工学会）
	山本　栄	東京理科大学（日本人間工学会）
	渡辺富夫	岡山県立大学（ヒューマンインタフェース学会）

アドバイザー

福田賢一	経済産業省
清丸勝正	経済産業省
前川睦敏	経済産業省

目　　次

はじめに ---------- i
委員一覧 ---------- ii
第１章　事業目的と事業内容 ---------- 1
　１．１　事業目的 ---------- 1
　１．２　事業内容 ---------- 1

第２章　概　要 ---------- 4
　２．１　実施方法 ---------- 4
　２．２　実施体制 ---------- 4
　２．３　実施スケジュールと実施状況 ---------- 6

第３章　知の統合に関するアカデミック・ロードマップ ---------- 9
　３．１　はじめに ---------- 9
　３．２　知の統合の推進に向けて ---------- 11
　３．３　文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて ---------- 15
　３．４　リスクガバナンスのための総合情報基盤構築 ---------- 24
　３．５　情報循環設計科学をプラットフォームとした定量的リスク科学の創生 ---------- 29
　３．６　持続可能未来社会デザインのための知の統合 ---------- 35
　３．７　低炭素社会の構築 ---------- 40
　３．８　電子民主主義による社会の構築 ---------- 46
　３．９　ヒューマン･マシン協働によるディペンダブルな安全・安心社会の構築 -------- 51
　３．１０　ロボティクス基盤高信頼社会の構築 ---------- 58
　３．１１　生産システムにおける知のプラットフォーム ---------- 63
　３．１２　計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知の統合-- 68
　３．１３　知の統合プラットフォームの機能と役割 ---------- 75
　３．１４　おわりに ---------- 80
　参考文献 ---------- 83

第４章　社会システムのモデリング・シミュレーション技術分野のアカデミック・ロードマップ ---------- 85
　４．１　はじめに ---------- 85
　４．２　複雑系と社会システムシミュレーション ---------- 88
　４．３　ヒューマンモデリングと社会システムシミュレーション ---------- 95
　４．４　社会システムシミュレーション ---------- 102
　４．５　国際公共政策シミュレーション ---------- 112
　４．６　経済制度設計のための社会実験シミュレーション ---------- 118

４．７　社会モデリング・社会システムシミュレーションにかかわる
社会学的課題 ---------- 123
４．８　経済行動シミュレーション ---------- 132
４．９　ものづくり・サービスづくりシミュレーション ---------- 139
４．１０　防災・安全シミュレーション ---------- 146
４．１１　文化・風土醸成のための参加型シミュレーション ---------- 152
４．１２　超高齢社会に向けた身体特性シミュレーション ---------- 158
４．１３　おわりに ---------- 163
参考文献 ---------- 166

第５章　人間・生活支援技術のアカデミック・ロードマップ ---------- 170
５．１　はじめに ---------- 170
５．２　個の人間の生活支援 ---------- 174
身体の形態計測と解析／日常生活計測システム／複合センシングから統合化計測／機能･行動のモデル化／喜怒哀楽の計測とモデル化／日常生活におけるパワーアシストの考え方／アカデミック･ロードマップ
５．３　個の人間と人工物とのインタフェース ---------- 183
「生きがい」とは何か／人間あるいは人間と環境の相互作用を計測する技術／情報提示技術／生きがいの材料を提供する技術／有用性評価技術
５．４　個の人間と個の人間から構成される社会 ---------- 203
人間の社会生活を支援する技術／人間の社会生活センシング／人間の社会生活モデリング／社会生活における共感インタフェース技術／社会技術システムの設計論／共感･共創･合意形成の科学
５．５　おわりに ---------- 217
参考文献 ---------- 220

第６章　アカデミック・ロードマップの広報・普及活動の報告 ---------- 224
６．１　はじめに ---------- 224
６．２　活動の概要 ---------- 224
６．３　活動の内容 ---------- 226
６．４　まとめ ---------- 235

第７章　まとめ ---------- 236
７．１　分野横断型アカデミック・ロードマップの概要 ---------- 236
７．２　知の統合の視点からのまとめ ---------- 239
７．３　今後に向けて ---------- 243

おわりに ---------- 245

第１章　事業目的と事業内容

１．１　事業目的

経済産業省が平成１７年度から進めて来られた「技術戦略マップ」およびそのローリング事業の一環として、平成１９年度事業として横幹連合では分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップを担当し、制御・管理技術、シミュレーション、ヒューマンインタフェース、ものづくりの４分野を取り上げたところであるが、さらに多くの切り口から議論する必要があることが浮かび上がってきた。

人間、社会、さらに機械との間のネットワーク化によって、社会におけるあらゆるシステムが極端に大規模、複雑化し、その結果、人間や社会といったそれ自身が複雑多様である要素がさらに複雑に絡み合った諸問題が、日常生活に突き付けられている。このような現在の社会的課題への対応には、多くの学問分野の知の結集が不可欠であるが、その連携はあまり進んでいない。特に工学系と人文社会科学系の交流が遅れている。これには、それぞれの学問分野を担う学会を横断する議論を進める上での、それぞれ独自の土壌で育った用語や価値観などの相互理解を可能にするプラットフォームの形成をまず進めなければならないにも関わらず、その方法論が確立されていないからである。また部分最適の対立に陥らずに全体最適を追求する調整手法の探求などにおいては、このプラットフォームの構築が極めて重要であることがあらためて認識されている。

平成２０年度は、新しい産業的価値創出やイノベーションには不可欠である異分野の知の統合や連携を可能にするための分野横断型科学技術のアカデミック・ロードマップを作成することを主目的とし、新しい産業価値創造や複雑な社会的課題の解決に向けた学術分野の展開を具体的に予測する。

本事業を通じ、ロードマップ策定プロセスでの新たな技術／研究シーズの発掘やそれらの将来展望のビジュアル化、また成果物としてのロードマップを産学官研究コミュニティで共有化することによるコミュニケーションの円滑化によって、ナショナル・イノベーション・システム構築の基礎となることを目的とする。

また、昨年度から進めてきた分野横断型アカデミック・ロードマップの成果とも併せて、アカデミック・ロードマップ作成の新たな視点と展望を提供し、その成果を広く公開することによってアカデミック・ロードマップ策定を加速・深化させ、さらにそれがロードマップに反映されイノベーションの目標をより明確化するというナショナル・イノベーション・システムの基礎構築に資することを目指す。

１．２　事業内容

本事業では、上記目的の達成のため、下記の項目を実施することとした。

① 分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップの新規作成
   (a) 知の統合技術分野
   (b) 社会システムのシミュレーション・モデリング技術分野
   (c) 人間・生活支援技術分野
② 広報・普及活動

以下, 各項目の内容について説明する。

① 分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップの新規作成

新しい産業的価値創出やイノベーションには異分野の知の統合や連携が不可欠であるという背景から、本事業では、分野横断化を可能とする共通基幹技術としての統合プラットフォームの構築のあり方とその方法論、統合プラットフォーム上での知の統合のメカニズム、知の統合のための新しい横断型科学技術の学問領域の創成などを具体化するアカデミック・ロードマップを提示することとした。さらに、解決すべき具体的な課題として、統合プラットフォームに基づいた社会システムのモデリング・シミュレーション技術、人間・生活支援技術の二つを取り上げ、より具体的な知の統合による課題解決に向けたアカデミック・ロードマップを作成することとした。

この課題は人間・社会の根幹に関わる極めて大きな課題であり、本年度の活動ですべてを検討し尽くすことは困難かもしれないが、少なくとも今後の検討のベースとなる骨格を提示することを目指した。

(a) 知の統合に関するアカデミック・ロードマップの作成（事業項目①(a)）

知の統合のための方法論を策定するための学術分野、普遍化と課題解決が機能する統合プラットフォーム上における新しい学問領域の構築とその展開、それによる波及効果や知の統合を必要とする課題解決のための学問領域の新たな創成の展開を予測するアカデミック・ロードマップ（ARM）を作成する。その際、下記(b)及び(c)の検討と連携を取りながら進めた。

統合プラットフォームには、新しい学術的方法論を構築する普遍化と、課題解決の具体的技術的実現を行う特殊化の二つの役割がある。知の統合技術では、対象や課題に強くは依存しない普遍性を持った様々な学術的方法論の ARM を描くとともに、これにより社会的課題がどのように解決していくかの側面からの ARM を描くことを試みた。

さらに、この個々の課題解決を通して、統合プラットフォーム上の学術的方法論の幾つかが統合され新しい学術分野の展開が生み出される可能性を有している。このように、普遍化と特殊化とはループを構成しており、この更新を通して統合プラットフォーム上に、知の統合を必要とする課題解決のための学術分野や研究分野が創出され進展していくことが期待されるが、新たな学問領域創成の可能性についても考察を行った。

また、このような横断型科学技術の知の統合プラットフォーム上に創出・展開される学術分野や研究分野として、リスクマネジメント、ディペンダビリティ評価、コンフリクトマネージメント、モデリング技術、データ解析、意思決定技術、最適化、制御など、多くの学術分野が関連する。これらの学術体系全体の統合プラットフォーム上への展開とそれによる課題解決の過程を考察し、社会が抱える課題の全体最適化へのアプローチを可能とする統合プラットフォームを創出していくARMを提示した。

(b) 社会システムのモデリング・シミュレーション技術のロードマップの作成（事業項目①(b)）

人文社会科学分野におけるシミュレーション技術やモデリング手法は長年に亘る膨大な蓄積データを持ちながらその利用は一部の経済予測に留まっている現状がある。今後、人間の行動を組み込んだ広範な社会システムのモデリング技術とそれに基づく社会デザインは極めて重要な課題であり、この課題解決に向けた文と理の知の連携を可能にする学術的な方法論や研究分野の将来展開のARMを作成することとした。

社会システムのシミュレーションでは、まず個人レベルの人間行動を忠実にモデル化することが結果の精度、信頼性を高めるためことにつながるので、そのために必要な人間行動の計測・分析技術や、認知モデル、人間と環境とのインタラクションモデルなどを検討した。つぎに、個人レベルの人間行動に基づいて集団レベル、組織・社会レベルへとシミュレーション対象の規模、複雑さを拡大するために、集団プロセス、分散認知モデル、人工社会などの技術を扱い、さらに、こうして高度化されたシミュレーション技術を活用、適用するためのデザイン技術、たとえば社会システムのパフォーマンス評価指標や創発的・共創的デザイン手法の研究の方向性を検討した。また、シミュレーションを実装するためのソフトウェア、ハードウェアを含む基盤技術である、大規模マルチエージェントアーキテクチャや、汎用シミュレーションツール、可視化技術なども検討した。

民主的で公正な合意形成の支援、科学的根拠に基づく社会運営、安全・安心で活力ある社会の実現にはリスクマネジメント、コンフリクトマネージメント、等が不可欠でありＷＧ１の活動と連携を取りつつ、人文社会系と理工学系の知見・技術を統合する、社会システムを対象とするシミュレーション技術の横断型ARMを策定することとした。

(c) 人間・生活支援技術のアカデミック・ロードマップの作成（事業項目①(c)）

社会が複雑化し多様化するにつれて、その中で生活する人間にとって、安心・安全が保証された人間・生活支援システムの構築は極めて重要な課題となる。この解決には細分化した学問分野、例えば、人間行動学、心理学、社会学、感性工学、ヒューマンインタフェース、ロボティクスなどを統合化することにより全体最適達成の目標に向けて研究分野や学術領域を展開していくことが必要である。この解決に向けたARMを作成することとした。

人間の形態、機能、行動等をシステム科学の視点でとらえ、近未来の安全で安心な社会構築のために、人間生活支援を目的とした科学技術を検討し、情報通信技術や計測技術等の理系の科学技術だけでなく、文系の心理学、言語学、認知科学などの分野も含めた学問分野を横断的に俯瞰し、近未来における課題解決のためのARMの作成を目指すこととした。

人間と社会が相互に関連する問題を分析し解決していくためには、その課題解決に向けた様々な学術知の統合と普遍化が不可欠である。問題の定式化や枠組みを個々の課題に対する共通化や普遍性の抽出に関しては（ａ）の統合プラットフォームと深く関わっている。また、人間が係わる課題へアプローチとして、心理学、行動学，社会学など社会科学の学術分野との知の共有や様々な事例の共有を有効に機能させる仕組みの上に創成される新しい研究分野やその方向性を示すことも重要である。

② 広報・普及活動

前節で述べたように、今後のイノベーションを考えるとき分野を超えた知の結集が不可欠である。分野横断型アカデミック・ロードマップは知の統合に正面から向き合うものであり、この成果を広報し普及させることはわが国のイノベーションにとっても重要な課題である。

昨年度の活動成果と今年度活動の中間成果とを併せて公開し、討論を行うことによって知の統合への理解が深まり、ロードマップを活用したイノベーションへ向けての基盤が強化されることを目指す。

本事業に関係する学術学会等においてアカデミック･ロードマップの広報普及活動を実施した。具体的な事業内容および実施方法に関しては第６章で述べる。

第２章　概　要

２．１　実施方法

前章の３つの具体テーマに対して、下記のワーキンググループ（以下 WG と記す）（WG1 から WG3 とする）をそれぞれ設置し、それらを統括する横幹ロードマップ委員会（統括委員会）を設置した。各 WG は、横幹連合の関連する会員学会の有識者（各々10 名から 15 名程度）から構成され、それぞれの課題に対して事業期間内に合宿討論を含め 4 回程度の会合を開催し、アカデミック・ロードマップを作成した。

(a) ＷＧ１：知の統合に関するアカデミック･ロードマップ作成

(b) ＷＧ２：社会システムのモデリング・シミュレーション技術に関するアカデミック・ロードマップ作成

(c) ＷＧ３：人間・生活支援技術に関するアカデミック・ロードマップ作成

本事業において、各ＷＧが担当するテーマは、一つの専門分野を担当する一学会では検討することが難しいこと、さらに人間、社会、自然を包含する課題を取り扱うことから、関連する横幹連合の会員学会だけでなく、人文社会科学分野からも広く委員を委嘱し、文理横断の広い視点から自由な議論ができる体制とした。また、これらの WG を統括し、全体の取り纏めを行う統括委員会として横幹ロードマップ委員会を設けて、全体計画の円滑な遂行のための各種の調整作業や各 WG の成果の取りまとめ作業を行うことを目的とした。

さらに、各 WG の検討概要の中間報告を平成 20 年 12 月 5 日～6 日に東京で開催された第２回横幹連合総合シンポジウムにて行い、WG 委員以外の参加者からの意見もフィードバックすることを試みた。また平成 21 年 3 月 31 日に東京で開催された横幹連合と横幹協議会の協同による拡大産学連携委員会にて，昨年度および今年度のアカデミック･ロードマップ作成の成果について報告し，今後の利用について討論することとした。

２．２　実施体制

本事業の実施体制を図２－１に示す。

横幹連合会員４２学会から課題に即した専門家を集め、アカデミック・ロードマップ作成の３課題に対応する WG（WG1～WG3)を設ける。

また、本事業を実施するための中枢的機能として横幹ロードマップ委員会を設け、横幹連合としてのアカデミック･ロードマップ全体をとりまとめる。三つの WG（WG1～WG3）を統括するとともに、広報・普及活動についての企画・推進及び関係部門との連絡調整にあたる。

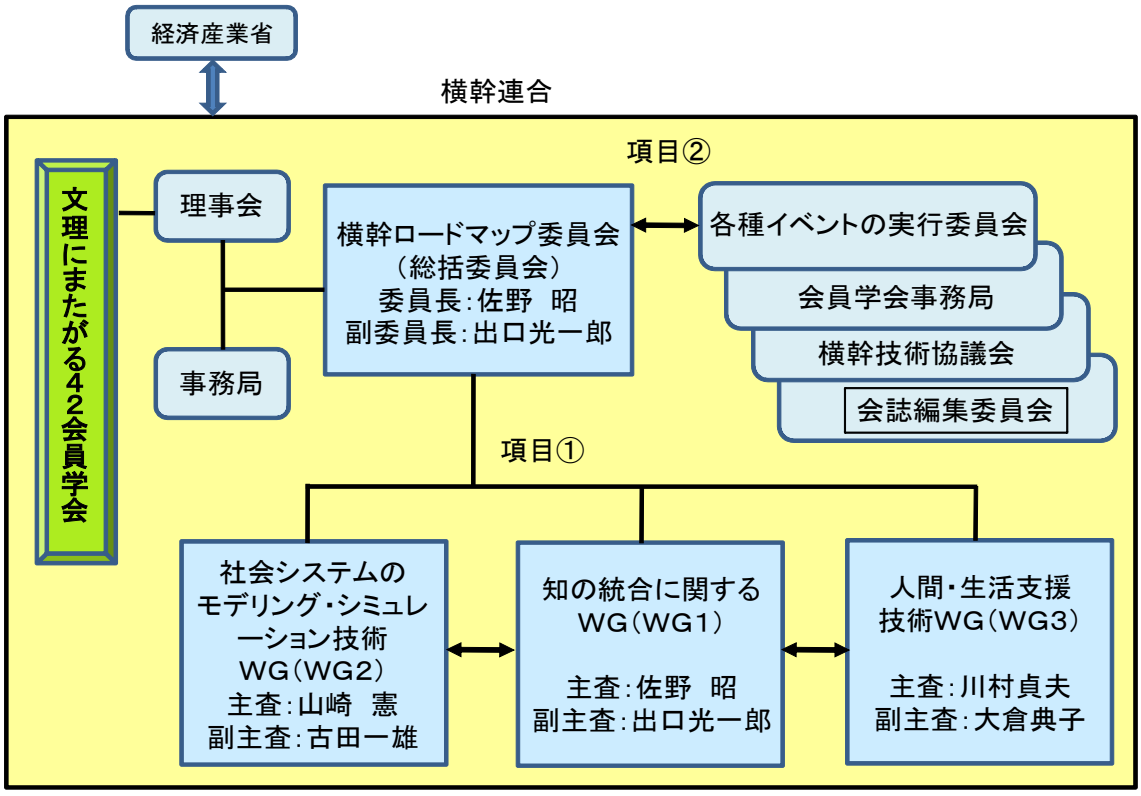

図２－１　アカデミック・ロードマップ作成体制

具体的な実施体制を以下に示す。なお各 WG の委員等については前掲したとおりである。

- 統括委員会（横幹ロードマップ委員会）

＜業務内容＞

下記の３つの WG を統括し、目標の設定、進行スケジュール等の管理・調整を行うと共に、本業務に関連する外部機関との連絡調整に当たる。さらにアカデミック・ロードマップの成果について広報し，討論する機会を設ける。

- WG１：知の統合に関するアカデミック・ロードマップ作成

＜検討内容＞

知の統合を推進し展開するための学術分野、普遍化と課題解決が機能する統合プラットフォーム上における新しい学問領域の構築とその展開、それによる波及効果や知の統合を必要とする課題解決のための学問的方法論の新たな創成の展開を予測するARMを作成する。さらに知の統合を推進するための仕組みのロードマップ作成も試みる。

＜参加協力学会＞

計測自動制御学会、日本社会情報学会、研究・技術計画学会、日本経営工学会、日本信頼性学会、応用統計学会、日本コンピュータ化学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会、日本知能情報ファジィ学会、日本リモートセンシング学会、日本経営システム学会

- WG２：社会システムのモデリング・シミュレーション技術に関するアカデミック・ロードマップ作成

＜検討テーマ＞

人文社会科学分野におけるシミュレーション技術やモデリング手法は長年に亘る膨大な蓄積データを持ちながらその利用は一部の経済予測に留まっている現状がある。今後、人間の行動を組み込んだ広範な社会システムのモデリング技術とそれに基づく社会デザインは極めて重要な課題であり、この課題解決に向けた文と理の知の連携を可能にする学術的な方法論や研究分野の将来展開に関して考察を行い、横断型アカデミック・ロードマップとして纏める。

＜参加協力学会＞

幹事学会：日本シミュレーション学会

ヒューマンインタフェース学会、人工知能学会、日本経済学会、数理社会学会、計測自動制御学会、日本人間工学会、プロジェクトマネジメント学会、日本シミュレーション＆ゲーミング学会

- WG３：人間・生活支援技術に関するアカデミック・ロードマップ作成

＜検討テーマ＞

社会が複雑化し多様化するにつれて、その中で生活する人間にとって、安心・安全が保証された人間・生活支援システムの構築は極めて重要な課題となる。この解決には細分化した学問分野、例えば、人間行動学、心理学、社会学、感性工学、ヒューマンインタフェース、ロボティクスなどを統合化することにより、全体最適達成の目標に向けて研究分野や学術領域を展開していくことが必要である。この解決に向けたアカデミック・ロードマップを作成する。

＜参加協力学会＞

日本ロボット学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会、ヒューマンインタフェース学会、日本感性工学会、日本認知心理学会、日本人間工学会

２．３　実施スケジュールと実施状況

本事業を実施するために図２－２のようなスケジュールを定め、この期間中に統括委員会および各 WG とも４回程度の会合を持って議論を行うこととした。実際に開催された会合実績を図中に▼印で、またその詳細を表２－１から表２－４に示す。この会合以外に、電子メールによる頻繁な議論を実施し、とくに纏めの時期では、各 WG による原稿取り纏めと統括委員会による原稿の精査・編集が電子メールをベースとして実施された。

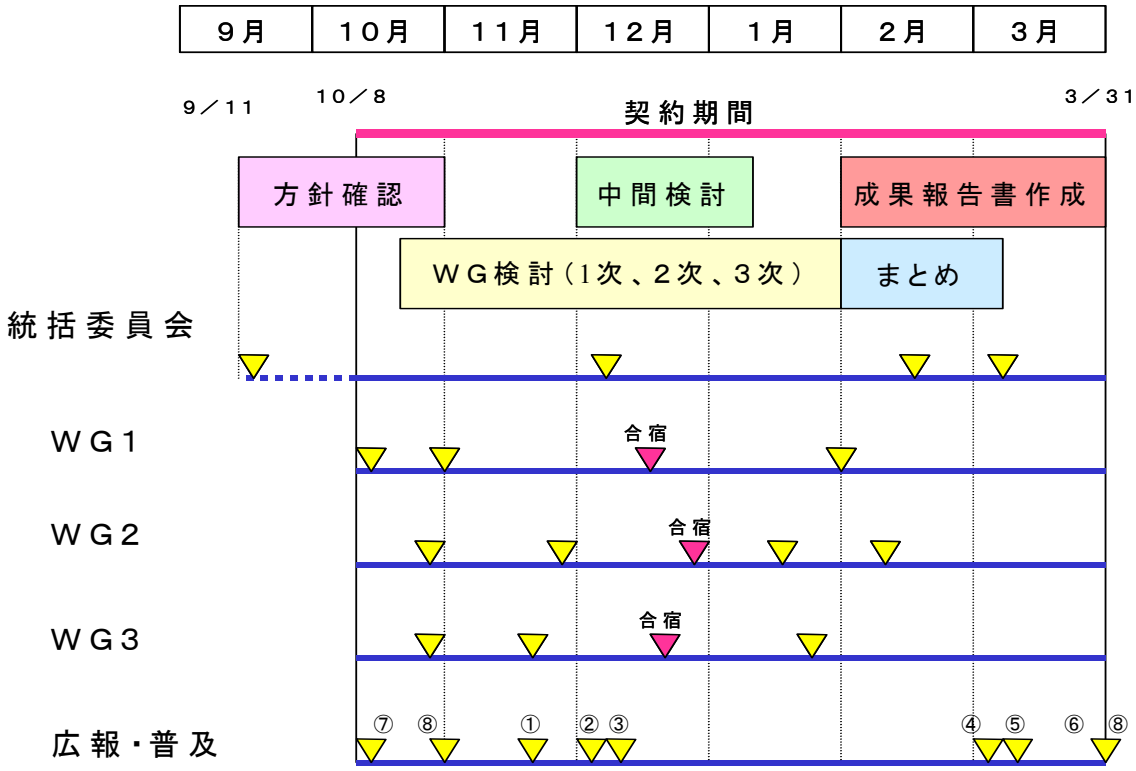

図２－２　アカデミック・ロードマップ作成スケジュール

表２－１　統括委員会（横幹ロードマップ委員会）

	開催日	開催場所	内容
第１回	平成 20 年 9 月 12 日	学士会館分館	趣旨説明、体制紹介、基本方針確認
第２回	平成 20 年 12 月 5 日	筑波大学	進捗状況の確認、広報活動に関する検討、報告書纏め方の概要確認
第３回	平成 20 年 2 月 13 日	東京大学	報告書まとめ方の確認、日程確認，広報活動の検討，
第４回	平成 20 年 3 月 5 日	東京大学	報告書内容確認と精査

表２－２　WG１：知の統合に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第１回	平成 20 年 10 月 13 日	慶大　三田	計画の確認、知の統合に関する討論、纏め方についての方針検討
第２回	平成 20 年 11 月　1 日	慶大　三田	知の統合に向けたシーズおよびニーズ別の課題検討
第３回	平成 20 年 12 月 13 日～14 日	大橋会館　東京	知の統合を推進するための施策とメカニズム、分野や課題別検討
第４回	平成 21 年 2 月　1 日	大橋会館　東京	全体マップの検討，執筆内容の検討、全体構成と検討と纏め

表２－３　WG２：社会システムのモデリング・シミュレーション技術に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第１回	平成 20 年 10 月 29 日	早大　理工学部	計画の確認、委員各位の活動分野からの話題提供、纏め方についての方針検討
第２回	平成 20 年 11 月 27 日	早大　理工学部	全体基調提示、委員各位による関連技術の紹介、12/5 パネル討論に向けた取り組み確認
第３回	平成 20 年 12 月 25 日～26 日	早大　川奈ＳＨ	各分野ロードマップ課題の検討、全体構成の検討、目次案検討
第４回	平成 21 年 1 月 20 日	早大　理工学部	各分野執筆内容の検討
第５回	平成 21 年 2 月 10 日	早大　理工学部	各分野執筆内容の検討、全体構成の検討と纏め

表２－４　WG３：人間・生活支援技術に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第１回	平成 20 年 10 月 27 日	立命館大学　東京キャンパス	計画の確認、委員各位の活動分野からの話題提供、纏め方についての方針検討
第２回	平成 20 年 11 月 17 日～20 日	立命館大学　東京キャンパス	取り纏め方針提示に対する議論、委員からの関連する話題提供
第３回	平成 20 年 12 月 20 日～21 日	大橋会館　東京	方針提示に基づく話題提供、3 グループに分かれて取り纏め検討、全体構成確認
第４回	平成 21 年　1 月 23 日	立命館大学　東京キャンパス	3 分野の執筆内容検討、全体構成の検討と纏め

図２－１　WG の合宿討議状況

第３章　　知の統合に関するアカデミック・ロードマップ

３．１　はじめに

学術の発展とともに理工系や人文社会系における知の体系は細分化の方向に進んできた。また細分化により新たな専門分野が生まれ、それを深めるためにさらに新たな知が生まれるというように学術の進展には知の細分化は必然であるともいわれている。しかし、人間、自然、人工物を含む社会におけるシステムが大規模化し複雑化し、この中で人間と社会と技術とが複雑に絡み合った諸問題の解決に対しては、細分化された知では対応ができないという状況も生まれてきている。また、細分化した限られた領域での解決策はしばしば部分最適である場合が多く、必ずしも全体最適な解を与えているとは限らない。科学技術の発展は、利便性の追求、大量生産・大量消費といった要求を満たしたが、反面多くの負の影響を社会に与えている。具体的には、安全・安心社会の実現や低炭素社会の実現など差し迫った問題に直面している。これらの課題を解決するためには、単に細分化した知の寄せ集めではなく、関連するそれぞれの科学技術の知の統合とその統合の将来のあり方を検討するところから議論を深め、一段高い論理レベルでの広い科学技術の連携と集積を必要とする。人間と社会が複雑に関連する課題解決には、分野を横断した規範が理念として存在しなくてはならないが、そのためには知の統合の技術が各分野を横に貫く「共通の枠組み」として、また「具体的に利用可能な共通ツール」として、実体的に整備していく必要がある。

われわれが直面している多くの課題は、人間、組織、社会、自然、環境などと複雑に絡んでおり、様々に分化した知を統合化する必要があり、そのための統合の概念、方法論、具体的な仕組みなどを実体化していくことが急務となっている。このためのロードマップはこれまで描かれたことはなく、本WGでは、基本的な議論から始め、知の統合を必要とする具体的な事例などを取り上げ、これらのアカデミック・ロードマップを作成するとともに、統合を推進するためのプラットフォームのあり方について検討を行った。

本章では、次節以降において、まず知の統合とは何か、それを推進するための方法論や仕組みには何が必要なのか、について述べ、知の統合による学術や技術が実課題への解を与えるメカニズムとしてのプラットフォームのイメージを示す。この後で、知の統合プラットフォームにより、創出される新しい学術分野や技術分野のアカデミック・ロードマップを、主に、人間、社会、環境、生産などに関連する課題解決に向けて提示し、最後に知の統合という視点からまとめる。

本章の構成は以下の通りである。3. 2 節では、「知の統合の推進に向けて」と題し、知の統合を推進するための知の統合プラットフォームの概念とそのプラットフォーム上に創出される新たな学術や技術による課題解決のメカニズムを述べ、以下の具体的な事例の枠組みを明らかにする。3. 3 節では「文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて」と題し、理工系と人文社会系との連携の必要性と相互理解に向けたプラットフォームの構築について述べる。3. 4 節は「リスクガバナンスのための総合情報基盤構築」であり、個々のリスク対象やリスク現象に依存しない共通性や異なる分野の概念融合に着目したプラットフォームの構築に向けたアカデミック・ロードマップを提示する。3. 5 節は「情報循環設計科学

をプラットフォームとした定量的リスク科学の創生」であり、情報循環設計科学をプラットフォームとする新しい学術分野の創出について述べる。3. 6 節では「持続可能未来社会デザインのための知の統合」と題し、統計科学・数理科学と関連する学術分野の統合による大規模システム推測プラットフォームの構築と諸課題の解決について述べる。3. 7 節では「低炭素社会の構築」と題し、2050 年の温室効果ガス排出量半減に向けた知の統合プラットフォームとそれに基づくアカデミック・ロードマップを示す。3. 8 節では「電子民主主義による社会の構築」と題し、コンフリクトの存在下での合意形成、政策形成のためのプラットフォーム構築について述べている。3. 9 節では「ヒューマン・マシン協働によるディペンダブルな安全・安心の社会の構築」と題し、機械と人間の連携するための諸課題を解決するためのプラットフォームを提示している。3. 10 節では「ロボティクス基盤高信頼社会の構築」と題し、ロボティクスを基盤として、社会科学と人間科学とを連携したプラットフォームについて述べている。3. 11 節では「生産システムにおける知の統合」と題し、未来の生産システムを支援するための知のプラットフォームの具体的な構築を示している。3. 12 節では「計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知の統合」と題し、基盤技術を大規模高速計算機システムとするプラットフォームについて述べる。 3. 13 節では「知の統合プラットフォームの機能と役割」と題し、これまでの各節で示されたアカデミックロード・ロードマップの実行を支援する統合プラットフォームのもつべき機能や役割についてまとめる。

３．２　知の統合の推進に向けて

３．２．１　知の統合とは何か、知の統合の契機は何か

学術の発展の結果として知の細分化が進むことを既に述べたが、知の統合は何らかの契機や積極的な意図なくして推進することは難しいと言われている。知の統合を一般的に定義することは難しいが、定義のもつ本質的な意味については、ある程度共通の認識が必要である。日本学術会議第 19 期の対外報告書において、「知の統合とは、異なる研究分野の間に共通する概念、手法、構造を抽出することによって、それぞれの分野の間の知の互換性を確立し、それを通してより普遍的な知の体系を作り上げること」と定義されている（日本学術会議，2007；日本学術会議，2008）。古くは、サイバネティクスにおける人間の脳の行動機能と人工物の制御との共通性の解明により、制御工学や生体医工学が創出されたこと、電気工学と機械工学とから高精度な運動の制御を可能にする新たな体系としてのメカトロニクスへの展開、最近では、分子生物学と計算機科学とが融合し新たなバイオインフォマティクス（生命情報学）の創出など、事例を挙げることができる。

前述した定義には、知の統合が具体的な課題やニーズを解決するための手段であるという目的志向が明示されていない。しかし、知の統合は、卓越した個人によって創出される場合を除けば、なんらかの社会的なニーズを背景としてそれらに応える成熟した学術分野が統合または融合されると考えられる。

本章を担当したＷＧ１では、知の統合とは、図 3.2－１に示すように、複数の学術分野が、統合を必要とする環境、背景、課題などを契機として、連携・統合化され、その結果新しい学術分野や技術分野が創出されることであると特徴づけた。このとき、知の統合がその役割を果たすためには、前述の定義に中にもあるように、共通性や普遍性をもつものでなければならず、これを機能させるためには、そこに知の統合のためのプラットフォームを構築する必要がある。単に複数の学術を寄せ集めてもそれぞれの領域でのローカルな

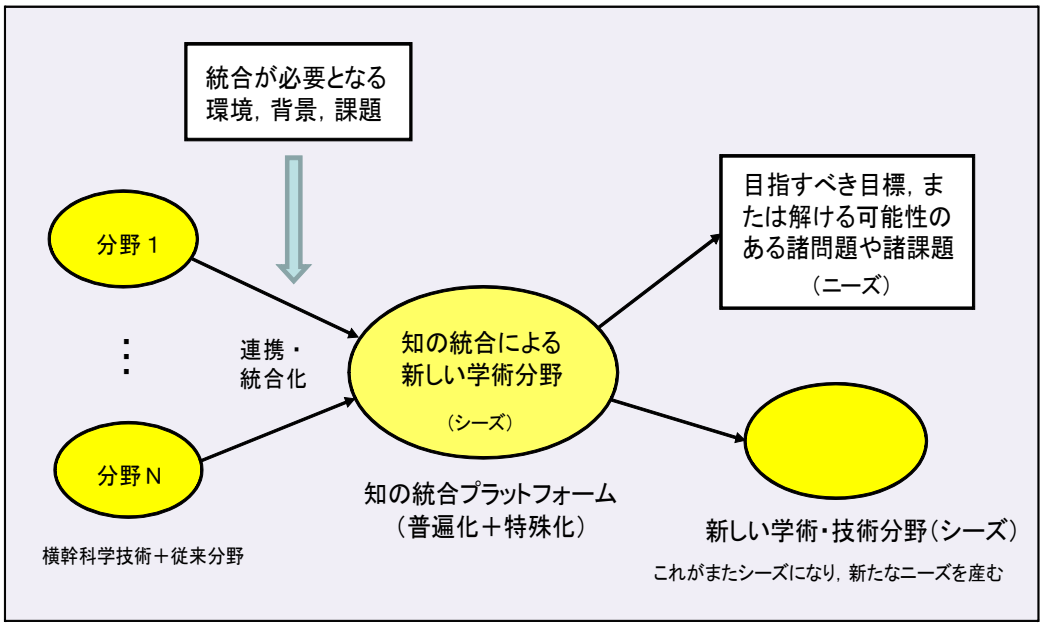

図 3.2－１　知の統合のイメージ図

最適化がコンフリクトを起こす危惧があることから、この統合プラットフォームのもつ共通性や普遍性は重要な役割をもつ。プラットフォームの役割については後述するが、このプラットフォーム上で、社会、人間、環境、人工物などを含む様々な諸問題や諸課題の解決に向けた探究が行われる。また、この知の統合プラットフォームから、新たな学術分野や技術分野がシーズとしてさらに生まれることもあり得る。

３．２．２　知の統合はなぜ必要か、何を生み出すのか

工業化から情報化への科学技術の急速な発展は、利便性の追求、大量生産・大量消費といった要求を満たしたが、反面多くの負の影響を社会に与えている。環境問題、食糧問題、医療問題、経済破綻など社会の安全・安心を脅かす課題に直面している。これらの問題はこれまでの個別学問分野では対応することが困難になっている。社会を形成する人間や組織が係わる諸課題は、課題そのものが包括的であり、それぞれに細分化された個別分野の知を単に寄せ集めても、様々なジレンマやステークホルダーが存在し、合意形成が極めて困難であり、その解決策を与えることが難しい。技術的に優れたものが、社会や個人に受け入れられるとは限らない。社会のコンフリクトには、ローカル最適化とグローバル最適化のコンフリクト、環境問題のような短期的最適化と長期的最適化のジレンマ、各国や地域の事情によるコンフリクト、最適性とロバスト性のコンフリクトなど、様々なジレンマが存在する。これらの解決には、理工系の分野と人文社会系の分野の両者を基盤とする新しい学術領域の創生が不可欠であり、それが知の統合の基盤となる。

産業界に目を向けても、これまでの大量生産・大量消費の行き詰まりから、新たなイノベーション創出、すなわち、新しい価値、サービス、新産業を創出することが緊急な課題となっており、各分野の産業技術や社会技術の知を融合し統合化することが不可欠になっている。未来の産業のあり方を予測し、どのようなコア産業により新たな目標やターゲットに到達できるのかを明らかにしていく必要があり、その場の経験によるプロジェクトマネジメントではなく、未来を見通した知の融合や統合をプラットフォーム上で実践できる人材の育成も必須である。

３．２．３　知の統合プラットフォームの役割

前節で述べたように、統合による新たな学術分野が、新たな学術の創出や社会的課題の解決に向けて貢献し、さらに進展するためには、異分野の知を統合化し共有化するための知の統合プラットフォームの役割が極めて重要である。

前述したように、統合を必要とする契機や背景のもとで、関連する複数の学術分野、すなわち理工学分野と人文社会学分野を基盤とした統合により、プラットフォーム上に創出される学術分野や技術分野が論理性をもって体系化される。図 3.2－2 に示すように、与えられた課題の枠組みを明確にし定式化することにより、プラットフォーム上の論理体系により実装プロセスを通して問題解決への対応策を与えることができる。様々な課題の問題の枠組みをプラットフォーム上に定式化し、モデリングするプロセスを、ここでは「普遍化」と呼ぶ。関連する分野であっても問題や課題は様々なモデル表現や記述を含むために、ここではできるだけ共通の言語やツールによる定式化が必要になるからである。一方、

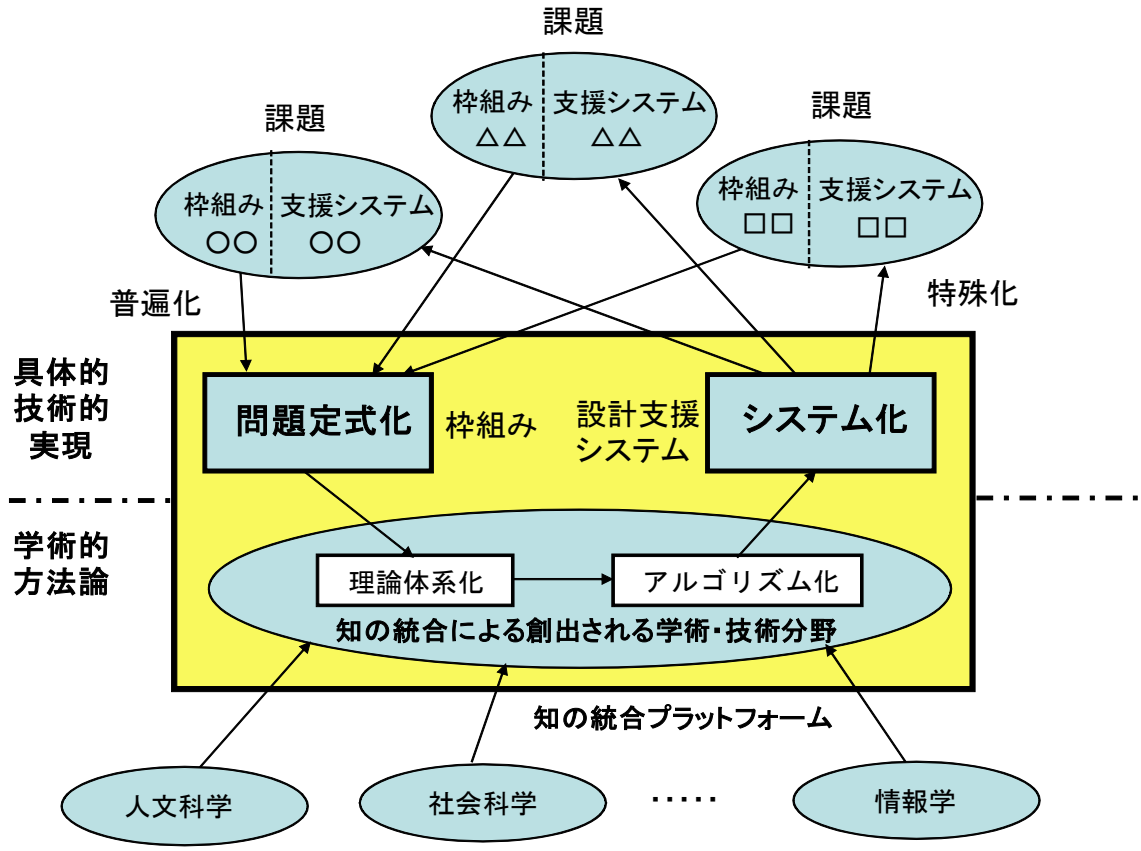

図 3.2－２　知の統合プラットフォームのイメージ

新しい方法論やアルゴリズムによって与えられる対応策の課題への実装のプロセスをここでは「特殊化」と呼ぶ。様々な課題に対して、知の統合プラットフォームは、普遍化と特殊化のプロセスを繰り返すことにより、プラットフォームへのフィードバックを介して、より共通性や普遍性のレベルアップが機能する。

この知の統合プラットフォームには、もう一つ重要な役割がある。知だけが統合されても、これらの知を共有または公有する仕組みと一体化されていなければならない。異分野の人々、専門家も専門家でない人も、メーカもユーザも、相互にコミュニケーションが可能でオープンなプラットフォームであり、共通の方法論やツールが利用できることが必須である。異分野間の相互理解には、単なる用語の解釈ではなく、共通原理の探究や文化そのものの理解まで必要になろう。相互理解を通して問題の多面的な定式化が可能になり、知識共有とコミュニケーションが可能となる。そのためには、分野を越えて議論ができるための場としてのプラットフォームには、分野横断型のモデリングや問題の記述方法など共通の手段の整備が不可欠である。

３．２．４　知の統合の推進には何が必要か

人間、社会、人工物を含む課題は、理工系と人文社会系のそれぞれも細分化した学術領域と深く関連している。これらの関連した学術を組み合わせても特定の課題の解決には繋

がることがあっても、広く関連する課題にまで適用できるためには、共通性や普遍性をもつ学術としての体系を構築することが望まれる。理工系と人文社会系を基盤とした普遍性や共通性をもった新しい学術体系を創り出すようなプラットフォームやその仕組みをいかに構築するかが大きな課題である。

異分野研究領域の人々の交流を支援する環境、オープンで知識交流や知識共有が可能なネットワーク、コミュニケーションや議論が可能な共通の場、などの整備が不可欠であろう。理工系と人文社会系を基盤する新しい学術の場において、技術分野や社会分野のさまざまな学術・技術の関連性、膨大で異質なデータや情報の処理、課題の多面的な視点からの定式化、など実践するためには、モデリング技法や相互理解のためのコミュニケーション技術などをその中で具体的に実現していくことが不可欠である。このようなコミュニケーションの場を通して、学会を横断したシンポジウムの企画や具体的な横断型プロジェクトの立ち上げなどが実行に移されていくことが望まれる。

大学・大学院においても、プロジェクト研究やミッション型研究では、文と理の壁を超えて研究者が共同研究を実質的に推進できるフレキシブルな組織構造が望まれる。たとえば、マトリックス型の研究体制を必要に応じて構築できる組織構造など、大学・大学院が組織としても融合型・横断型研究への支援できることが必要となる。

理工系の技術者、研究者であっても、自らの専門分野を深めるだけでなく、科学技術と社会との関わりに目を向け、社会的影響を考慮していくことが望まれる。さらにプロジェクトを推進するリーダーには、幅広い横断的な視野と複数の学術分野の専門性も要求されるであろう。このような分野横断型の人材をいかに育成するかは、小中高における文理横断型教育の推進、大学における文と理の融合の必要性に裏づけられた基礎教育の充実などが望まれる。また、大学院修士課程および博士課程においても、自らのディシプリンにおける研究成果に加えて、異分野への理解、人間、社会と技術との関係、産業やビジネスへの展開を語れること、研究室の壁を越えて異分野の人々との交流やネットワークへの参加を積極的に進めていくなど、融合型、横断型の思考をもった人材に育てていかなければならない（ミニ特集, 2009）。融合型、横断型研究と教育とを有機的に連携させることは人材育成にとって重要な課題と思われる。

さらに、文と理の融合型や横断型の研究を国として支援する体制の整備も大きな課題である。研究資金申請に対する審査方法や評価方法を早急に議論する必要がある。現状では、従来のディシプリン型の審査方式により、審査員もディシプリン分野の研究者が主だった体制で行われている。このような融合型・横断型研究の申請項目や評価項目の設定には新しいコンセプトが必要である。諸外国でもさまざまな試みがされており、一定割合を分野横断型研究や融合研究に配分する方法や、複数の研究機関の連携を必要とする研究課題やネットワーク型研究などへの支援が考えられている。これまでのディシプリン型研究に対する方法とは異なる視点やコンセプトからの審査・評価方法の検討が急務である。

３．３　文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて

３．３．１　相互理解型社会の構築

近年、「文理融合」の必要性が論じられ、また、文理融合を掲げた学部・学科の創設も行われている。とくに興味深いのは、工学系大学や医学系大学、あるいは人文社会学系大学など、総合大学ではない大学でも、文理融合をうたう例が増えていることである。

なぜこのような事態が起きているのだろうか？それは単なる一時的な流行なのだろうか？だが、改めて考えてみれば、日ごろ疑いもなく受け入れられている「文系」「理系」という二つのカテゴリーは、それほど自明のものなのだろうか？

そもそも古い文明においては、文理は一体のものであった。アリストテレスもピタゴラスも、自らを「自然科学者」としてではなく、「真理を探究する者」と位置づけて、世界の諸問題に対する解を得ようとしたのである。しかし、時代が進むにつれ、学問が高度化して行くにつれ、学問は細分化された専門領域へと枝分かれし、個別的な進化の方向へ向かった。(この過程で、便宜的に「文」「理」という分け方も定着してきた)。

その結果、個別の領域の専門深化は進んだかもしれないが、あたかもバベルの塔のように、専門領域相互のコミュニケーションが困難になりつつあることは否めない。そしてそのプロセスの中で、学問は、その目的を見失ってはいないか？

学問は、単なる知的好奇心や功利を目的とするものではない。それは、人びとのための、あるべき社会を創造するための営みなのである。われわれの社会に貢献する「知」の探求において、「分類」が現実に先んじることがあればそれは奇妙なことである。時代の要請にこたえる「知」の創出には、全体を俯瞰する視線と専門進化とが同時並行的に有機的に行われなければならない。にもかかわらず、今日では大学の教養教育が衰退している（冒頭に述べた「文理融合」の提唱は、実態としての「文理分離」の逆説的な結果ともいえる)。またその前段として、高校などですでに文理に分離された教育が当然のこととされている事態がある。このような日本の教育状況は、世界の中でもとくに際立っており、問題が大きい。

本節では、このような認識にたった上で、「文系」「理系」という二大カテゴリーの内部での「横断」のみならず、「文系」「理系」を貫き包括する総合的視座が必要であることを―とくに横断科学技術創成のために―論じるものである。それは、われわれが現在直面しているさまざまな問題、環境問題、産業問題、貧困問題などに、すべての専門家と生活者たちが協力して立ち向かう「相互理解型社会」の構築を遠望するものである。

３．３．２　文理横断はなぜ必要か

（1）文理はなぜ分離したか

先にも述べたように、そもそも古い文明においては、文理は一体のものであった。学問探求の対象は、「人間」を含む「世界」であったからである。

近代科学が形成された 17 世紀頃にあっても、このような世界観は維持されていた。近代科学の祖とされるニュートンもパスカルも、その合理的精神は、新しい時代の哲学によって基礎づけられてこそ、時代を動かしたのである。彼らは古典的科学者であると同時に、哲学者・思想家としての相貌をもっていた。では、いつどのように文理は分離したのだろ

うか？それは思いの外、最近のことであるようだ。

文理分離より先に、学問の個別分野への分裂が起こった。それは 19 世紀のことであると村上陽一郎は示唆している（村上, 1999）。日本語では、Science を「科学」と訳したが、それはこの時期に、学問が個別分野の集成となっていたからである、と村上は述べている。産業革命を経て、個別領域が専門深化するにつれ、特定の領域に特化した専門家が必要とされるようになったからである。

だがそれでも、「文理」はいまだ一体のものとして捉えられていた。「文理」とは「文」と「理」の合体ではなく、「物事の筋目（を究める）」という意味で、西欧における「faculty of philosophy」に対応する「文理学部」をもつ大学も多かった。日本の大学から文理学部が消えていったのは、1970 年代以降のことである。

日本ではこの傾向はその後さらに進み、高校教育においてさえ、早くから理系と文系に分けられた教育がなされるようになった。1990 年代以降は、大学から一般教養課程が弱体化することによって、文系と理系が境界を越えて学ぶことが少なくなったのである。

（2）「文」「理」の違いは何か？

こうして、今日では、「文」「理」が違うことは当たり前のように考えられており、高等学校の教育現場では、基礎知識も十分でないうちから「文系」「理系」に学習内容が分けられているのが実態である。この分別は、大学受験を想定したものであり、実質的には「数学の点がよいか否か」によって規定されることが多い。

しかし、このような分断的教育は、次のような点から、教育上好ましいとはいえない：

1. 将来の職業を問わず、数学は必要である。「普通の生活に数学は要らない」などという俗説が流布しているが、数学は現実を論理的合理的に理解するうえで必須である。
2. 人間が社会的存在である限り、自分の生きている社会、地域、歴史文化などを知る必要がある。自然科学に偏った教育は、「社会人を育成する」教育にはふさわしくない。
3. 「理系」「文系」の区別は、不適切な格差意識や対抗意識を生みがちであり、学習を、望ましい「知の探求」からそらせてしまう恐れがある。もちろん、「文」「理」という分類をより理念的な観点から説明する立場もある。たとえば、「理系」は「普遍法則」を探求し、「文系」は「個別価値」を記述するとか、「理系」は物質を対象とし、「文系」は人間や社会を対象とする、といった規定である。けれども、こうした分類も、よく考えてみるとその境界はあいまいである。むしろ、個別科学への分岐と専門進化の過程で、便宜的に分類がなされていったのが現実ではないだろうか。

（3）文理分離の弊害

文理の分離にそれなりの理由があったとしても、そこには多くの問題が潜在している。

第一に、（一部の人びとが誤解しているように）、科学技術と一般社会は相互に独立に存在しているわけではない。たとえば遠藤も指摘した（遠藤, 2007）ように、社会は技術に枠をはめ、同時に技術は社会を規定するのである（図 3. 3－1 参照）。

第二に、ハバーマス（Habermas, 1968）が論じたように、科学技術はあたかもそれ自体で価値を持つかのような幻想に陥りがちであり、その結果、社会・人間を無視して自己目的に

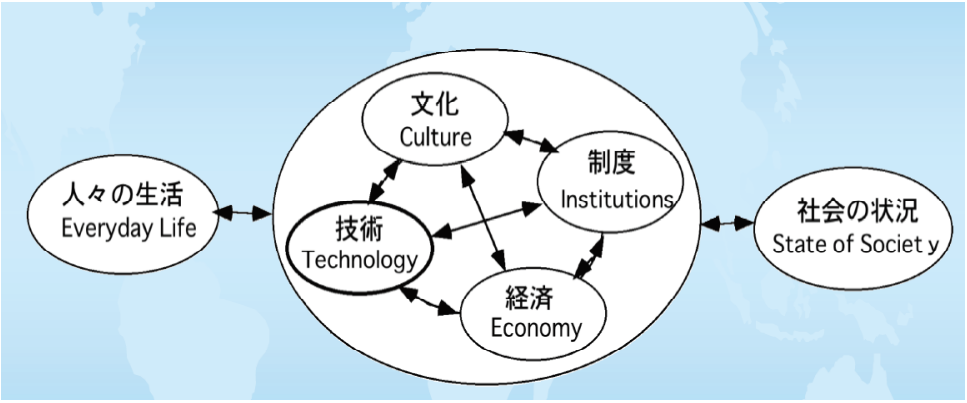

図 3. 3－１　社会変動と科学技術

突き進むおそれがある。それは時として人間社会に災禍をもたらしかねない。

第三に、他方、科学・技術についての適切な知識や理解をもたない人びとは、科学技術に過剰な期待を抱いたり、過剰な不安を抱いたりしがちである。それは科学技術の健全な発達を阻害するだけでなく、社会の健全性をも損なうおそれがある。

第四に、反面、人文社会科学系の学問が、自然科学的な研究手法や研究態度と隔絶されることも奇妙なことである。にもかかわらず、時として、人文社会科学系の学問は、思弁のみに依存し、情緒性に訴えることをもって良しとするような風潮が見られる。

第五に、こうした文理の間隙に、似非科学的な言説が跋扈するような状況も見られる。「科学」の名を以てまき散らされる迷妄は、社会に危険をもたらすものである。

いずれにせよ、狭い専門領域に閉じた研究は、新たな創造性への契機を失いかねない。

（４）今日的課題としての文理横断

特に今日、グローバリゼーションの潮流、すなわち世界規模での相互依存関係の緊密化は著しく、一つの事態についても、膨大な数のサブシステムが関与している。

その結果、現代の地球社会が直面している重大な危機、「環境問題」「食糧問題」「疫病問題」「テロリズム」「グローバル経済」「情報問題」などには、既存の個別学問領域で対処することは不可能となっている。また他方、産業経済にもある種の閉塞感が漂っている。従来のような消費中心の社会はもはや維持し得ない。それに変わる新たな産業の形も、異分野の（ことに文理の）視点の衝突によって、まさに触媒されると期待される。

このような状況に立ち向かうには、文理分断の弊害は早急に克服されなければならない。

そしてそのためには、分離融合的な研究の場を多く開くだけでなく、教育の場でも分離融合の重要性を意識した教育システムの確立が望まれるのである。

３．３．３　文理横断は可能か

（１）文理横断の諸形式

文理横断（文理融合）の必要性を認識している人びとは少なくない。文理横断（文理融合）をめざしたディシプリンや学科（学部）などの設立の動きもめだつ。そうした試みは、さまざまであるが、以下のようないくつかのタイプに分類することが出来る。

(a) 文理横断的なディシプリンの発見・再発見

(b) 複数のディシプリンの連携
(c) 教養課程（一般教育）の見直し
(d) リベラル・アーツを柱とする教育体系
(e) 文理横断――知の体系全体を統合・再編する

（２）文理横断の困難と可能性

文理横断の重要性については、総論的には多くの人々が認めるだろう。だが、いずれの試みも、具体的に実践しようとするならば、ただちに幾多の困難に遭遇する。たとえば次のような困難である。

(a) 文理相互の不信感
(b) 文理における概念構成や用語の齟齬
(c) 文理の目的の不一致
(d) 方法論の違い
(e) 学習量の膨大さ
(f) 教育者の困難

これらの困難は、いずれも厳しい壁となる。けれども、いかに困難であってもこれらの問題を乗り越えなければ、われわれの社会を持続可能なものとすることは出来ない。

３．３．４　文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて

（１）文理横断に向かう大学教育の現況

冒頭にも述べたように、文理分断については、教育の場でも反省が拡がっている。今後の目標や計画に「学際」「(学科)横断」「文理融合」などを掲げる大学も多い。

平成 19 年 3 月における「各国立大学の中期目標・中期計画」（http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/houjin/07061813.htm）の公表資料を見ると、全 87 大学のうち、「学際」「融合」「横断」などの方向性を挙げている大学が極めて多いことがわかった（表 3. 3－１参照)。

この表だけ見ると、「文理融合」に関する意識は低いように感じられるかもしれない。しかし実際には、他の「学際」「融合」「横断」などのキーワードが使われる文脈では、自然科学の個別分野間だけでなく、文理の垣根を越えた研究領域が想定されていることがほとんどである。とくに、ほとんどの大学が「教養」について言及しているということは、文理の分断に対して反省的な意識が広く共有されていることを意味している。

では、これら中期目標・中期計画において、「文理融合／横断」をどのように実現しようとしているだろうか？整理してみると、次のようなタイプに分けられる：

(a) 教養教育の充実
(b) 専門教育と教養教育の連携
(c) 学部間、学科間での連携
(d) 新学科の創設
(e) 大学間連携

こうしてみると、新たに学際的・横断的学科／学部の新設だけでなく、既存の研究組織の連携によって学際的・横断的な研究や教育を推進しようとしている大学が多い。

また、研究領域間だけでなく、学界と実業界の融合や、教員と職員の融合を目標に挙げ

る大学もあった。

表 3. 3－１　平成 19 年 3 月の中期目標・中期計画に、「文理横断」関連の用語を用いている大学数（全 87 大学）

中期目標・中期計画に用いられている用語	大学数	割合（%）
「学際」	69	79.3
「融合」	59	67.9
「横断」	51	58.7
「教養」	81	93.1
「文理」	13	14.9
「文理融合」	12	13.8

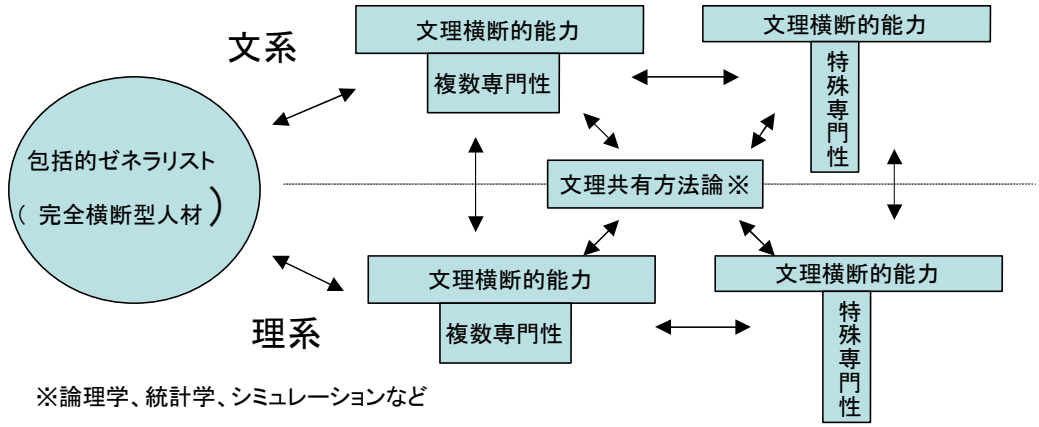

図 3. 3－２　「横断」の連続性

（２）文理対話の場としてのアカデミー再興

いずれにせよ、われわれはまず、始められるところから始めるべきである。（1989 年に人びとがベルリンの壁を踏み越えていったように）、文理の対話の場を拡大していくべきである。具体的には、文系・理系が一堂に会する場（研究会やシンポジウム）を拡大する。また、こうした場での対話を円滑で建設的なものとするファシリテータを重視することも忘れてはならない。

では、こうした役割を誰が担うのだろうか？

たとえば、日本が既存の体制から脱皮し、新たな知の地平へとこぎ出そうとしたとき、その中核を担う文化運動の場として構想されたのが、明六社（明治 7－8 年）であった。明六社規制によれば、「社を設立するの主旨は我国の教育を進めんが為に有志の徒会同して其手段を商議する」ことであった。すなわち、変化する状況のもとで新たな知の体系を共有し、また啓蒙するために、多種多様な知に携わる人々が協働する場としての「アカデミ

ー」が求められたのである。

「アカデミー」とは、ギリシャの哲学者プラトンが創った「アカデーメイア」を語源とし、西欧では今日も社会的にも大きな影響力をもつ学会（学術団体）をいう。

横断科学技術連合は、まさに今日、文理横断――横断科学技術の緊急性を人々に知らせ、その具体的な骨子を構想する「アカデミー」としての役割を担うものである。

また、その議論は、日本学術会議のような、より広範な「アカデミー」に提議することによって、さらに大きな影響力を持ち得るだろう。学術会議ではすでに「科学者コミュニティと知の統合委員会」が「知の統合?社会のための科学に向けて?（平成 19 年 3 月 22 日）」を提言している。今後もこうした検討は続けられるべきであり、横断科学技術連合もそれと共振しつつ議論を進めたい。

（3）次世代のための文理横断的教育

そして上記のような議論を承けて、次世代に文理の知識・理解をバランスよく提供することも重要である。初等教育・中等教育においても、文理を分断することは望ましくない。将来いかなる専門家になるとしても、対象を多面的総合的に理解し問題を解決するには、総合的な「教養」と専門性とがともに不可欠である。

たとえば、2000 年代後半になって、世界的に経済の停滞がささやかれ、雇用問題が大きくクローズアップされてきた。超大国であるアメリカの自動車産業さえ存亡の危機に瀕している。こうした事態に対して、従来型の問題解決方では、科学技術をさらに前進させ、その産業化によって経済を活性化させる、という方針が良しとされてきた。しかし、今日、環境問題が緊急課題とされ、また一方では人びとの価値観やライフスタイルが変化して、高度な技術や安価な商品に対して誰もが購買意欲をもつわけではない。ましてや、産業の活性化がかえって国内労働市場を不健全なもの（雇用の非正規化や国外移転）とするようなことがあれば、経済や産業の基盤としての「社会」自体が破綻してしまう。他方、現代では経済の活性化のために「ソフトパワー」（日本の「クールジャパン」など）への関心が高まっている。

こうした状況に対応するには、科学技術者も、自らの専門性を高めるだけでなく、広く「社会的なるもの」に目を向け、自らの研究の社会的意義や社会的影響に関するリフレクシブな考慮が必要である。また、人文社会科学に携わる人びとも、科学技術に対する正確な理解にのっとって助言することが求められよう。この双方があいまって、より高次の「心豊かな社会」が実現される。

とはいえ、すべての人がすべての領域を専門的にカバー（横断）することは出来ない。科学技術の高い専門性を確保するには、特定領域に深く特化しつつ社会的な議論にも目配りができる人材が望まれるだろう。しかし、何らかのプロジェクトをとりまとめていくような人材としては、幅広い横断性と複数領域にまたがる専門性を兼備した人材が必要である。さらに、企業戦略や政策決定に携わるものには、ほぼすべての領域に関して包括的な理解力が必要とされる。結局、横断性と専門性の兼ね合いは立場によって連続的であり、さまざまなレベルでの「横断的人材」がそれに応じた役割を果たすことで、全体（社会、国家、企業・・）の「質」を高めていくことが、現実的でもあるだろう（図 3. 3－2）。

だが、横断の連続性のどこに位置するにせよ、初等教育、中等教育で、その準備がなされていなければならない。数学、国語、社会、理科のバランス良い教育が必要である。と

くに、文理で共有される方法論としての、数学、論理学、言語コミュニケーション、統計学、シミュレーションなどに関する基礎的な教育は、これまで必ずしも十分な教育が行われてこなかった。これらについての教育に大きな力を注ぐ必要がある。

明治の文明開花期、日本が迅速に西欧文化を取り入れることが出来た背景には、子どもたちにも分かりやすく科学技術をといた人びとがいたことを忘れてはなるまい。例えば、石井研堂（1865－1943）は、『明治事物起源』（大正 12 年）などで知られる百科全書的人物であるが、彼は児童雑誌や叢書『理科十二ヶ月』（明治 32 年）などを通じて、子どもたちに科学の面白さを子どもの目線から伝えようとした。こうした人々の貢献を、いま改めて評価し、継承する必要がある。

（4）相互理解型社会の構築

では、われわれの目指す「相互理解型社会」はどのように構築されるだろうか？図 3. 3. －3および図 3. 3－4を参照しつつ概略を説明しよう。

まず、問題（シーズ）は個別の領域の専門家によって発見されることが多い。しかし、それは孤立したものではなく、他の専門分野からは同じ問題の別の側面に関する知見が現れるだろう。つまり、ある一つの問題も、様々な角度からの知見や発見を総合することによって、光と影を含めた立体的な理解が得られることになる。

ところが、ある特定の問題に関する知見でも、分野が異なれば、それを表すタームや定式化の方法が異なり、議論が困難出ることが従来ネックとなってきた。これを解決するためには、分野横断的なモデリングが重要となる。たとえば、シミュレーションや統計、数学などの方法論である。

さらに、モデル化された問題を、分野を超えて研究者たちが情報共有し、議論を戦わせる＜コミュニケーションの場＞が必要となる。このコミュニケーションの場に関する研究を行うのが、社会情報学、アーカイブス学などである。こうして「問題」は多面的に解析され、機能だけでなく逆機能をも含めて検討することが可能となる。

しかし、それだけでは十分ではない。いかなる問題も、それは研究者のものではなく、この世界に生きるすべての人びと――「生活者」のものだからである。そこで、専門的研究者たちの統合知は、一般の生活者たちに公開され、共有され、議論される必要がある。この点が、従来の「知の統合」には大きく欠けていた部分である。

この過程を経て、政策提言などが行われ、社会は漸進的に「相互理解型」へと再帰的に接近していくことが期待されるのである。

３．３．５　文理を架橋する横断型研究者

われわれはもちろん、ギリシャや古代中国の時代の「知の体系」に復帰することはない。

現代社会はあまりにも大規模化・複雑化しており、これを一手に扱い得るとは考えられない。だからこそ、多様な個別領域が、共通の土台を見いだし、また相互に連携し、相互に適切なモニタをすることが、どうしても緊急に必要なのである。

それがうまく機能すれば、基礎研究のみならず、新たな理論や技術を創成する上で大きな貢献となるだろう。

横断科学技術連合もまさにそのために設立された。

その「横断」の範囲が、自然科学・技術の範囲に留まっていては、ほとんど意味がない。

歴史の中でいつの間にか分断されてしまった文理を、その本来の意味である「物事の条理を究める」という地点において、再び架橋する研究者が、必要とされている。

そのためには、「研究」の観点からは、(1)文理を横断して研究者たちが日常的にコミュニケーションすることのできる場の整備と(2)文理を横断して研究者たちの相互理解を促進するためのモデリング・ツール（シミュレーション、統計学など）が不可欠である。同時に、次世代を担う研究者たちを育てる「教育」の観点からは、(1)初等教育から高等教育にいたるまでの一貫した「文理横断」型教育、(2)大学における教養教育（副専攻などのシステムを含む）の再構築などについて、早急に議論を深めていく必要がある。

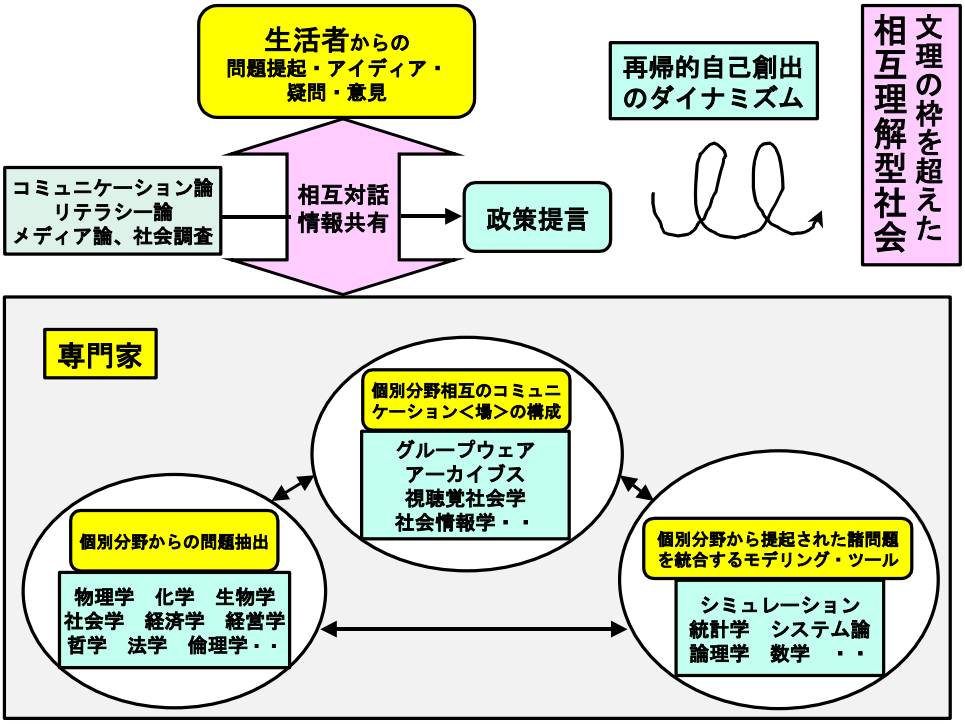

図 3. 3－３　文理の枠を超えた相互理解型社会構築のための知の統合プラットフォーム

図 3. 3－４　相互理解社会に向けたアカデミック・ロードマップ

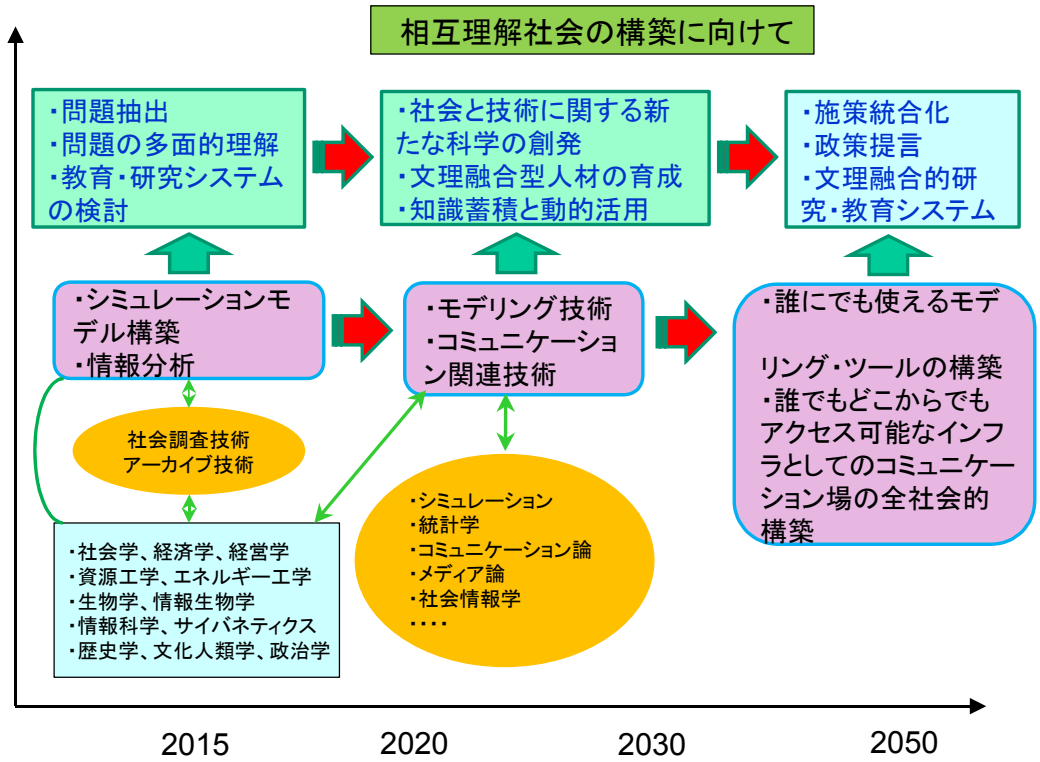

図 3. 3－３　文理の枠を超えた相互理解型社会構築のための知の統合プラットフォーム

３．４　リスクガバナンスのための総合情報基盤構築

３．４．１　はじめに

近年、リスクという用語が専門的文献や新聞、一般雑誌・書籍のような様々な媒体によって、ますます頻繁に使用されるようになってきている。いまや、あらゆる科学技術分野が何らかの意味でのリスクを含まないことはないといって良い。Ansell ら(Ansell et al。 1992)は「リスクは人間存在にとって本質的であり、あらゆる人間行動に含まれている。基本的にリスクはとるべきものであって、避けられるものではない」と述べている。同時に、合理的な意思決定にはリスク因子とその評価が必要であることは従来よりよく知られている。それにもかかわらず、リスクに関わる諸問題の議論が止むことはない一つの理由は、リスクの問題が実に広範であって、学問的に考察しようとすれば、あらゆる学問分野を含むほどの学際的立場を必要とし、どの観点からみるかによって見え方がかなり異なるということによる。このことから、ある根本的問題点が認識できる。それは、リスクの考察・研究においては、誰もが素人であることを免れ得ないということである。それゆえに、ある種の分野のリスク研究の専門家であったとしても、分野を問わない一般リスク研究の専門家であるということはほとんどあり得ない。このことを念頭におき、「群盲象を撫でる」の一人たる愚を犯すことを承知の上で、ここでは、可能な限りリスクに関わる知の構造と分野融合の可能性と必要性、また、将来を見渡してのロードマップについて考えてみよう。

３．４．２　リスク研究に関わる知の構造

このように、論じること自体が極めて困難なテーマであるが、ある一面を取り出して、みやすくすることは可能である。図 3.4－1 は、リスク研究に関わる 4 つの段階を層（レイヤー）として示したものである。レイヤーの配列としては、学術的基礎をレイヤー１のリスク解析として下に示している。技術や組織に関わる観点をリスク管理として 2 番目におき、3 番目には異なる組織や個人間の学際的あるいは組織間リスクコミュニケーション(D. M. Kammen et al.,1999)を置き、さらに社会的適用・実現形態としてのリスクガバナンス(谷口, 2008)を第 4 のレイヤーとしている[注1]。それぞれのレイヤーには、筆者が代表的な問題点の一つであると思われるものを書き、かつ各レイヤーについて関連分野を右に示している。

このように、異なるレイヤーに応じて、問題の種類も異なる。リスク解析に関わる理論のレイヤーでも、不確実性の取り扱いは確率論的リスク解析にとどまらず、人工知能分野での技法も有力であるなど､様々に異なる｡意思決定を主に考察する第 2 のレイヤーでは、古典的な合理的意思決定の方法から、リスク認知(中谷内, 2006)の要素を取り入れた限定的合理性を提案するモデル、また即時の意思決定を必要とする場合など、明らかに合理性の限界を超える状況もとりあつかわれる。第 3 のレイヤーにあるリスクコミュニケーションは、元来特定の意思決定に関わる主体（stakeholder）が行うべき認識の共有化のための方法論と概念であったが、ここでは、一般的に学際的分野における異なる専門家や実務家、更には非専門家も含めた様々な主体間の概念の共有化に用いるべきであり、今後その方向にむかうと考える。なぜなら、このような概念の共有化と相互認識によってはじめて、第 4 レ

注1　リスクガバナンスには社会的な調整メカニズムが含まれる

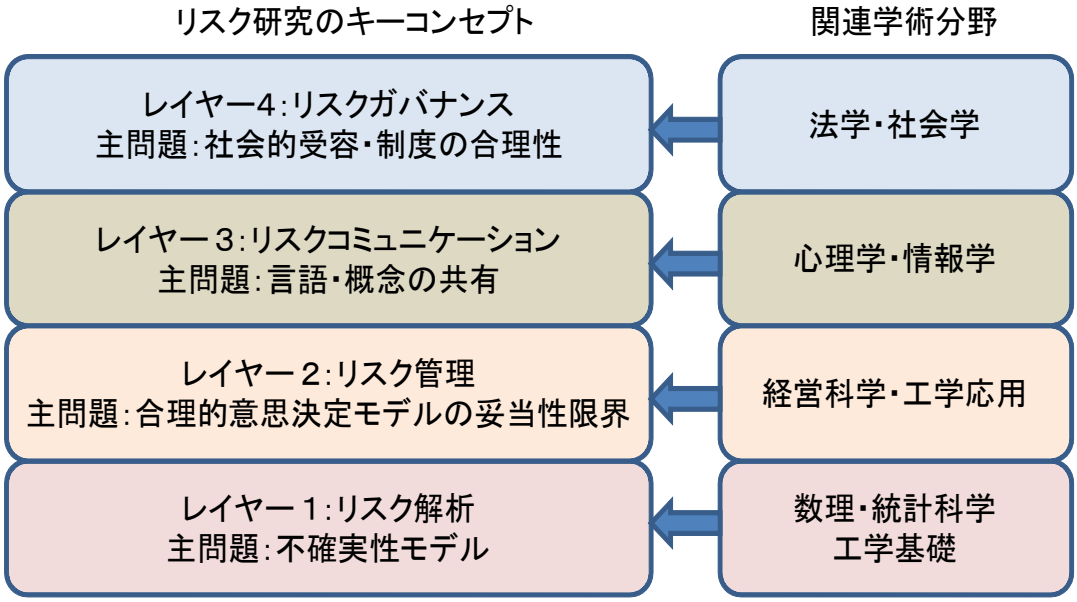

図 3. 4－１　リスク研究の４つのレイヤーと関連分野の現状

イヤーのリスクガバナンスが、より満足すべき形で社会的に成し遂げられるからである。

この図全体を知の構造としてみたときに気づく問題点がいくつかある。一つは、冒頭にも述べたことであるが、リスク研究が極めて広範であり、右に示した関連分野も代表的なものを挙げただけで、あらゆる分野がこれに関係するといって過言でないことである。このことから、新たな学問分野がリスク研究に必要となることは明らかである。また同時に、異なるレイヤー間の交流は比較的乏しいということが言える。これらのことを考えながら、次の節では、今後の展開をロードマップとともに示してみよう。

３．４．３　リスク研究に関わる今後の展開と知の融合ロードマップ

リスク研究という広範な領域において、今後どのような現象が起きるのかを予測することは容易ではなく、予測も限定した立場に拠らざるを得ないが、これを考えるためのカギはいくつか存在している。一つは、リスク研究に関わるトピックのうち、経営リスクに関する研究と環境リスクに関する研究とは無視できない割合を占めており、しかもこれらは互いに対照的な観点を有していることである。対照的というのは、経営リスクが基本的にリスクをとる立場であるのに対し、環境リスクはリスクを避ける立場で論じられていることである。しかしながら、中西(中西, 2004)が言及しているように、環境リスク学においても合理的意思決定の可能性は追求されてきているのである。このように、対照的にみえる分野間においても深い考察によって共通性が存在することは次第に明らかとなり、異なる分野の間の概念融合の有用性は一層強く認識されつつある。

これら 2 つの分野がこれまでどのような概念をもたらしてきたかをみれば、今後の予測についてある程度予想はできる。その一つについていえば、金融リテラシーのように各分野で使われているリテラシー概念が普遍化するということである。リスクリテラシーという用語は既に使われはじめており、この言葉のままで普及するかどうかはわからないが、これと同等あるいは類似の概念は普及していくであろう。また、環境教育が普及していっ

たことをみれば、リテラシー概念の普及に歩調を合わせて、リスク教育について議論がなされ、これに対する制度が実現されるであろう。これらのことは、今後のリスクガバナンスに対する社会的要請から必然的に生じてくるものである。この際、「リスクゼロ神話」と呼ばれる現象、すなわち、人々は専門家であると非専門家であるとを問わず、実際にはリスクをゼロにすることは求めていないにもかかわらず、リスクのゼロ化を求めているかのように報道される現象などは克服されなければならない。

また一方、従来の学問の発展をみると、技術進歩により融合化した分野や、社会的要請により融合した分野は数多い。リスク研究においては、研究者の参入は今後も増え、それとともに新たな概念が誕生してくるであろう。また、哲学や倫理学のような伝統的分野もリスク研究にとって必要であることは疑いない。具体的例をあげれば、中村雄二郎による共通感覚論(中村, 1979)なども一つのヒントになり得ると思われる。

同一のレイヤーの中では、分野の融合や新技術の開発はより容易である。また、レイヤー1 と 2 の間、レイヤー3 と 4 の間では情報の共有化は比較的容易である。問題は、すべての分野を通じての分野融合の可能性と必要性である。基礎のレイヤーにある研究者が実践的な立場に立つとき、従来より上のレイヤーの影響を受け、情報を吸収してきた。しかしながら、上のレイヤーへの情報フィードバックをどのように行うかが課題である。人間の情報処理能力は限られており、いかに技術が進歩したといえども、今日複雑化した諸体系を十分理解することは難しい。従って、分野間の情報・概念共有を進めていくための情報技術として、効率よく知識と概念を習得するためのツールが必要である。現在高度に発達した web 情報の世界すら十分とはいえず、高度に発達したリスク情報の基盤（データ・技法・概念解説を含む包括的な情報システムとしての基盤）が必要となろう。先の図に示したすべてのレイヤーを社会的観点からみるとき、リスクガバナンスを指向していると考えることができる。よって、このリスク情報の基盤をリスクガバナンス総合情報プラットフォームと呼ぶことができよう。

このようにみると、図 3. 4－２に示すように、リスクガバナンスの社会的要請と、そのためのリスクコミュニケーションの必要性を基調とし、各分野の発展形態としては、教育・哲学・倫理学など新分野の参入とともに、各分野におけるリスク研究が進展し、これらの融合によって、リスク教育、リスク情報学、リスクリテラシーなどの発展が見込まれる。その後、分野間の知識共有と教育のための総合情報基盤がリスクガバナンスを目的として発達し、リスクガバナンス情報プラットフォームという形をとると予想される。この情報基盤整備がはじまるのは早い時期からかも知れないが、完成には時間がかかると思われる。なお、ここで述べたリスクリテラシーやリスクガバナンスなどの概念も新たな概念に置き換えられることが予想されるが、そのような概念になるかは筆者の予想の範囲を超えている。

また、今後生じる様々なリスク事象が、この図における研究内容を左右することは大いに考えられるが、ここで示した図式そのものは多くのリスク事象について共通と考えることができる。

３．４．４　リスクガバナンスのための知の統合プラットフォーム

これらの考察に従って、リスクガバナンスのための知の統合プラットフォームは、先に

述べた総合情報基盤とほぼ同義であり、図 3.4－3 のようにまとめることができる。図 3.4－1 の各レイヤーに対応する学術分野の他、新たに参入すべき哲学、倫理学、教育学からの知を共有・統合し、データやツールの開発、人的ネットワーク構築、教育システム開発などが実施される。リスク解析、リスク管理、リスクコミュニケーションに対してその成果が示されるが、最終的により良いリスクガバナンスを目的として、このプラットフォームが役立っていく。

より良いリスクガバナンスをめざすための知の統合の必要性はいうまでもない。リスクそのものの概念の中に、多くの学術分野を横断する概念が含まれているからであり(Ansell et al., 1992)、なかでもリスクガバナンスは異なる社会的立場間の調整という意味が含まれるからである。ただし、異なる分野間の知識の交換と流通を促進するためには、ここに述べたリスク情報基盤の整備が必要であり、それがプラットフォームを形作る。

このプラットフォーム形成のための施策としては、上記関連分野における若手研究者育成のための文理融合的かつ中長期的な研究プロジェクトが望ましい。既存の枠組みにとらわれず、新たなコンセプトとパラダイム形成に積極的で、柔軟性のある指導的研究者グループを中心として、この研究プロジェクトを組み、その成果は、上に述べたリスク情報総合情報基盤の開発とともに、リスクガバナンスに関するプラットフォームを示唆する入門書と専門書の形で世に問うていくのが良いと思われる。

さらに進めていえば、一般論ではあるが、教育のグローバル化のなかで、既存の文科系・理科系といった教育課程の分類はもはや通用しなくなっているといえよう。リスクガバナンスの議論の中でも、研究に加えて、新たな教育の枠組みも検討すべき時と思われる。

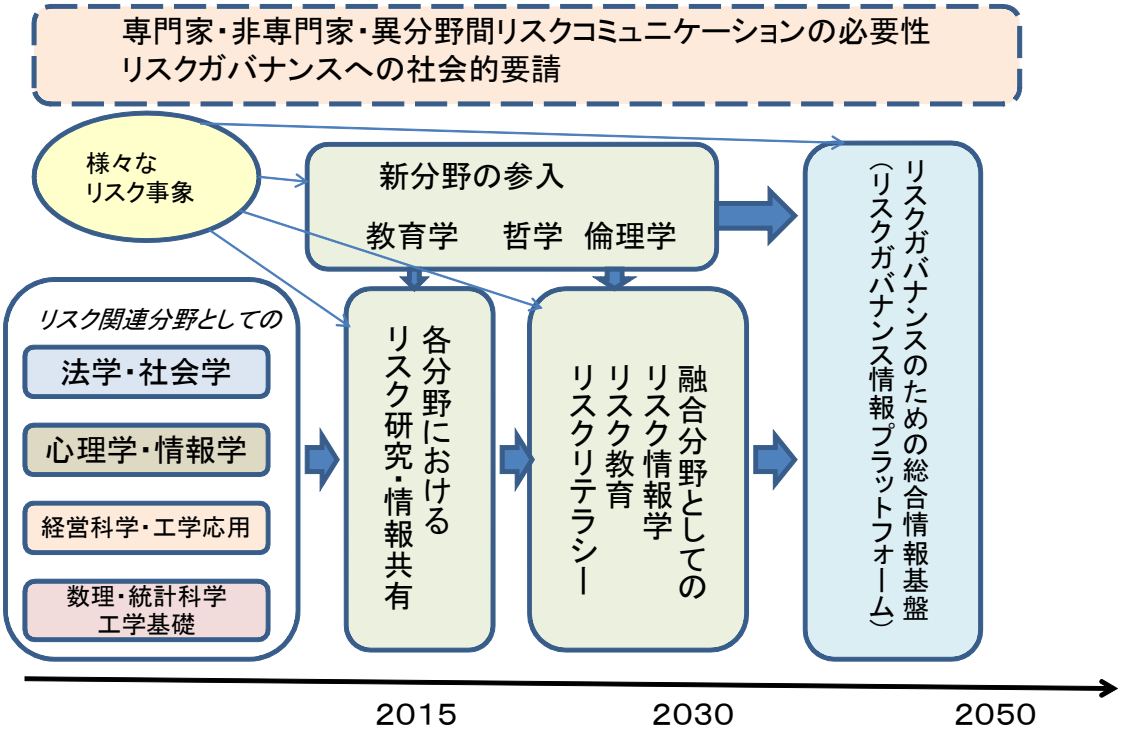

図 3.4－2　リスク研究のロードマップ

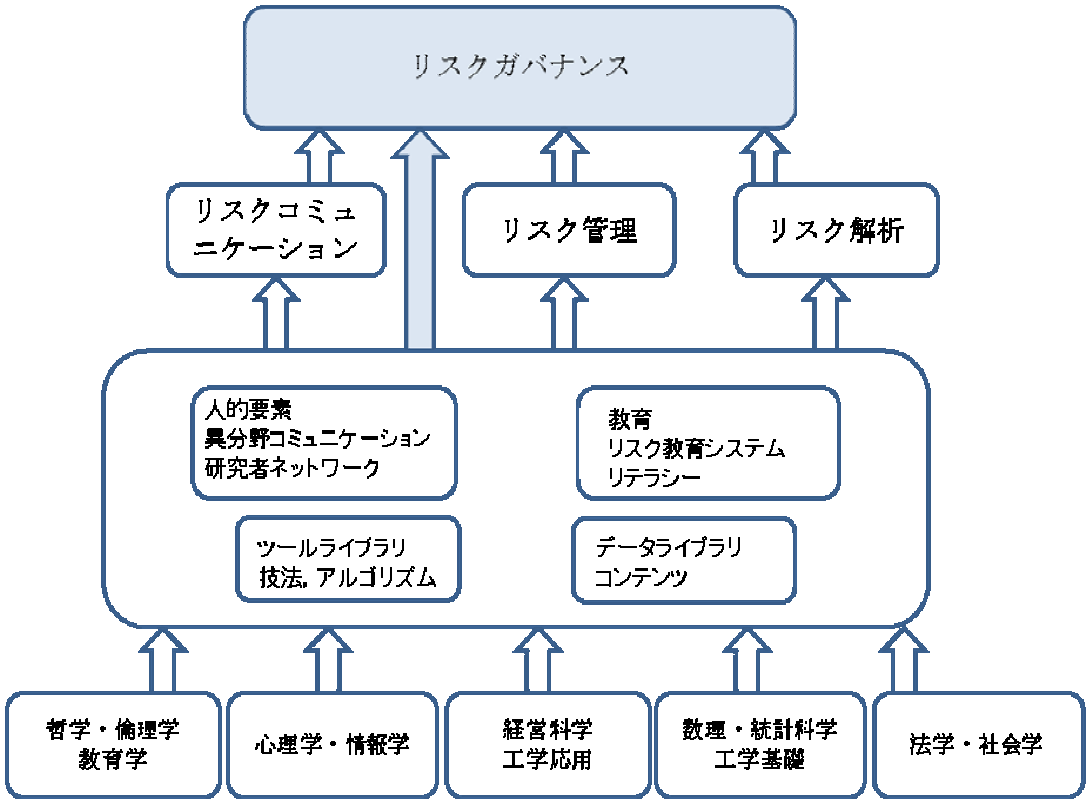

図 3.4－3　リスクガバナンスのための総合情報プラットフォーム

３．５　情報循環設計科学をプラットフォームとした定量的リスク科学の創生

３．５．１　数理科学と諸科学との知の統合：科学の文法構築を契機として

Pearson は、「科学の文法」(Pearson, K , 1892)を整備し、知の統合を提唱し、推進した。UCLA の科学史教授 Porter は、Pearson の「文法」を「知識マネジメント(Knowledge Management)」の嚆矢と位置づけている。Pearson にとって、「知とは連関によって現象をコントロールすること」であり、この連関を記述する「法則」とは、予測などの便宜のために人間が自然に与えているものに過ぎない。Pearson は、ヒストグラム、標準偏差に始まり、相関論、重回帰、適合度検定などを「科学の文法」支援ツールとして開発し、尤度原理、実験計画法を開発した Fisher, R. A. と共に近代統計科学のパイオニアとして位置づけられている。一方、Pearson は、科学を「知の内容」を問う具体的科学と「知の様式」を問う抽象科学（応用数学）とに分類し、更に前者を無機的現象を扱う「物理科学」と有機的現象を扱う「生物科学」に分類した。彼が提唱した知の統合とは、抽象科学と物理科学との統合と物理科学と生命科学との統合である。彼自身「科学の文法」の中で、幾何学と物理学の統合、物質とエネルギーの同等性などを提言し、この本を 1902 年に輪読した Einstein に影響を与えた。一方、Pearson は、自身の開発した応用数学（記述統計学）と生物科学とを統合し、19 世紀末に生物学分野の「連関」の記述を開始した。これが、「計量生物学（Biometrics）」の開始であり、その後、計量生物学は Fisher の開発した推測統計学を取り込み、医薬品、食品、化学物質のリスク評価の基幹的方法を創生するにいたる。また、Spearman が一般知能因子の測定方法（因子分析）に関わる「計量心理学(Psychometrics)」の最初の論文(Spearman, 1904)を発行すると共に、20 世紀は「計量経済学(Econometrics)」、「統計的品質管理(Statistical Quality Control, Techno-metrics)」など実証科学と呼ばれる計量諸科学の創生に成功した。20 世紀末においても、新たに環境やリスクを対象とする計量科学が生成されている。

３．５．２　統計科学とリスク評価学との統合がもたらしたもの

Fisher の実験計画法(Fisher, 1935)は、同時期に確立した Neyman-Pearson の仮説検定論と共に、実証科学の推論様式を標準化した。これによって工業実験など多くの分野で、製品のリスク・ベネフィットに関する「証拠に基づく(Evidence-based)」判断が可能となった。特に 1960 年代のサリドマイド事件以降、新医薬品のベネフィットとリスクの検証は、実験計画法に基づく無作為比較臨床試験データの採取と仮説検定論の適用が、社会制度として義務付けられ、この結果計量生物学分野が細分され「医学統計」という独自の科学領域が創出に至った。

一方、リスク評価に直接関連した数理統計学は、Wald によって「統計的決定理論」(Wald, 1950)として定式化された。統計家の使命は、損失関数を可能な限り小さくすることと規定され、損失関数の期待値が「リスク関数」と定義された。更に、Wald の「完全類定理」によってベイズ推論に基づく決定の最適性が証明された。しかし、「ベイズ決定によるリスク最適化」には、多次元数値積分を要し、当時としては計算不可能であり、Wald の事故死以来、次第に閑却されてしまった。この結果、1980 年代以降、統計的決定理論による正当化を経ないアドホックな決定規則が多数提唱され、現実の問題解決に応用される傾向が

顕著となった。ところが、1990 年代以降、マルコフ連鎖・モンテカルロ（MCMC）法によって最適解を数値的に求める実用的な計算環境が整備された。

したがって、現在用いられているリスク対応技法は、最新の計算科学に支援された統計的決定理論の立場から再評価し、改善することの可能性が、既に現実的になっている。しかしながら、リスク関数の評価だけでは最適なリスク対応には不十分であり、整数計画法を含む最適化技術の相当な進展がリスク対応の最適化には必要と考えられる。

３．５．３　情報科学と統計科学の統合がリスク科学にもたらすもの

Tukey は、これまでの仮説検定論を基調とする「検証的データ解析(CDA)」に代わり、データから仮説を発見するための「探索的データ解析（EDA)」を提唱した(Tukey, 1960)。彼は、ベル研究所とともに、C 言語のデータ解析機能を強化した S 言語を開発し、「データ解析学派」と呼ばれる新たな統計科学の領域を創生し、現在、統計科学の中では、計算機統計学という分野として確立している。これに対して 1980 年代後半以降の情報科学の進展によって、大量のデータを計算機処理することが可能となり、データから有用な知識を「発見」しようとする動きが情報科学の立場から急速に勃興し、「データマイニング」の方法が確立した。我が国でも「発見科学」、「アクティブマイニング」として組織的に研究され、Tukey の構想したデータ解析技法は、むしろ情報科学の中で発展したと考えることができる。

このように、現在発見科学的の手法によって大規模データから高速に所定のパターンを抽出することが可能となった。近年、厚生労働省も医薬品の副作用発見に対して、この方法論に期待し組織的研究を開始した。しかし、発見された仮説の信頼性を定量的に評価する研究は未だ発展していないために、リスク因子に関する定量的評価が必要な分野では、これらの技術が十分支持されていない。Tukey は、多くの候補仮説からの仮説選択の過誤確率増大について、警鐘をならし、探索的データ解析への多重比較法導入の必要性を強調した(Tukey, 1977)。しかし、統計科学と情報科学との独立性が高まった今日、情報科学的方法論の数理的正当化は、サポートベクトルマシンにおける Vapnik 次元等の近似上限評価に留まっている。情報科学的方法によるリスク仮説発見が日々なされている状況にも係らず、その証拠力を統計学的に評価し、リスクに係る仮説発見から当該仮説検証に至る知識成長ないしは仮説発展プロセスを定量的に最適化する研究は試みすら無いのが実情である。

したがって、リスク発見の科学確立のためには、統計科学と情報科学を統合し、データから仮説（モデル）を高速に抽出し、その定量的信頼性を評価する仮説発展プロセスを構築することは不可欠である。

３．５．４　定量的リスク科学創生のプラットフォームとしての情報循環設計科学の役割

リスクマネジメントについては、国内外共に既に「リスク特定」から「リスク評価」、「リスク対応」を経て「リスクコミュニケーション」に至る標準プロセスが確立している。例えば、日本工業規格 JIS Q2001「リスクマネジメントシステム構築の指針」も 2001 年に発効した。しかし、リスクマネジメントをリスク情報の「知識マネジメント」ととらえて、学術領域・社会活動を横断する統計科学・情報科学的方法を最適配置する「定量的リスク科学」構築こそ喫緊の課題である。このためには、Pearson の認識科学生成プロセスを拡

張し、社会のための学術としての「設計科学」の文法を明示することが急務である。ここで、設計科学の意図する設計は工学的設計の範疇に留まらず、マネジメント、政策、ひいては文芸・芸術一般などを包含する人間・社会の価値観に起因したデザイン一般を総称したものである。

設計科学の文法の第一次案として、 Tsubaki, Nishina and Yamada は、「実社会からの価値選択」から「要求価値の工学モデルへの変換」、「モデル上での最適化」を経て「最適化された価値の実社会への注入」といった一般設計科学生成サイクルを提唱した（図 3. 5－１）(Tsubaki, et al.. 2008)。

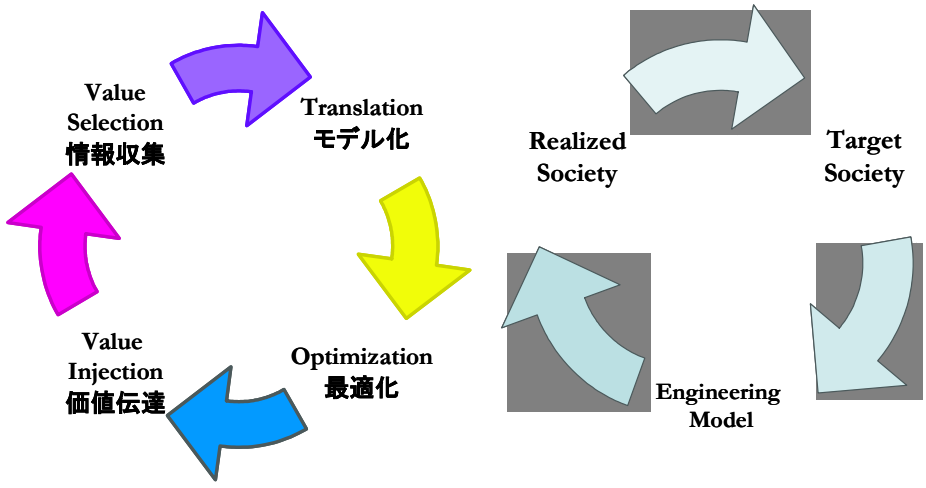

図 3. 5－１　設計科学の情報循環モデル

また、このそれぞれの行為をディシプリンとする横断的情報科学、情報工学が存在すると考えられる。すなわち、社会から価値を発見的ないしは意図的に選択する方法論を扱う科学（情報検索学、発見科学、対話を中心とする質的研究の方法学等）、価値を創生するシステムを同定する科学（統計科学、複雑系の科学を含むシステム科学など）、システム上で価値生成のパフォーマンスを最適に設計する工学(制御工学、通信工学、最適化工学など)、創生した価値を社会に実装し納得してもらうための工学（メディア工学、コミュニケーション工学など）などがそれである。さらに、これらの横断的な 4 つの情報科学、情報工学を「リスク」問題といった場を利用させて、情報循環全体を俯瞰する「情報循環設計科学」に融合させることが、定量的リスク科学の確立には不可欠である。いや、定量的リスク科学のみならず、情報循環設計科学は、価値観を前提とする人間・社会の学術全般を反証不能な規範的科学から知のスパイラルアップが可能な設計科学に昇華させる不可欠のプラットフォームとも考えられる。

この情報循環上の知のスパイラルモデルは当初、技術開発マネジメントなど経営科学分野のために構想したものだが、現在では設計科学領域に属する「定量的リスク科学」体系化にも初期プロセスモデルとして、特に有効と考えている。事実、リスク科学領域では、これまでの検証的統計科学方法論のみでは、価値選択や注入を包含した設計科学文法構築は不十分であり、3. 5. 3 で述べた情報科学との有機的結合のあり方をマネジメントサイエンス側面から検討し、初期プロセスモデルをより実社会の潜在要求に適応したものとしな

ければならなかったからである。特に、研究者と実社会とのインタフェース領域に係るリスク情報受発信プロセスを研究改革し、リスク情報マネジメントプロセスの適正化を実現し、新たに開発される情報科学（発見）と統計科学（検証・最適化）とが融合された方法論をリスク情報と仮説の成長プロセス各段階に最適配置しなければならない。

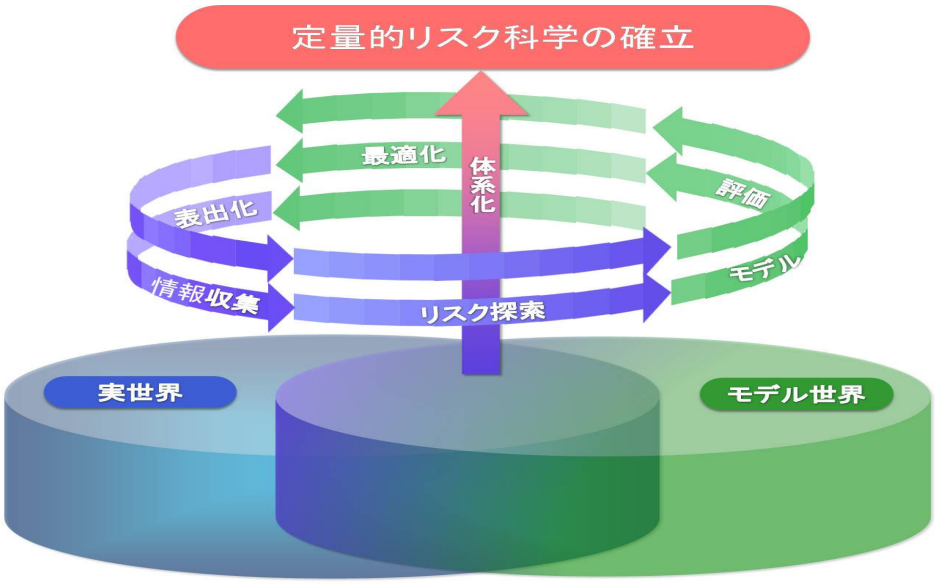

図 3. 5－２　定量的リスク科学の構想(北川, 2008)よりの引用

すなわち情報循環設計科学をプラットフォームとして開発されるべきリスク科学とは、個別の方法論の適正羅列による問題解決論ではなく、発見・モデル化・最適化・還元といった、実社会とモデル社会を循環するリスク情報・知識の進化プロセスをマネジメントサイエンス的側面と情報・統計科学的方法論の側面から同時に適正化した学術である。この横断的学術体系は、物質・生物・社会科学領域で独自に発展しているリスク科学ないしはリスクマネジメントの進化・発展を整合化させると共に加速する。

なお、図 3. 5－１の情報循環モデルの中では、特に「価値注入」、すなわち「リスクコミュニケーション」に関わる情報・統計科学あるいはそれを超えた応用数理科学的理論（数理コミュニケーション工学）が欠如していることも明らかである。すなわち、人間･社会が有する応答特性を勘案した情報通信論を支える横断的数理科学が他の３ステージに比して明らかに脆弱なのである。

３．５．５　定量的リスク科学構築のための知の統合とロードマップ

以上の議論を総括し、プロットフォームとしての情報循環設計科学と横断的定量的リスク科学構築、更には人文・社会科学全般野設計科学化へのロードマップを表現したのが図3.5－３である。

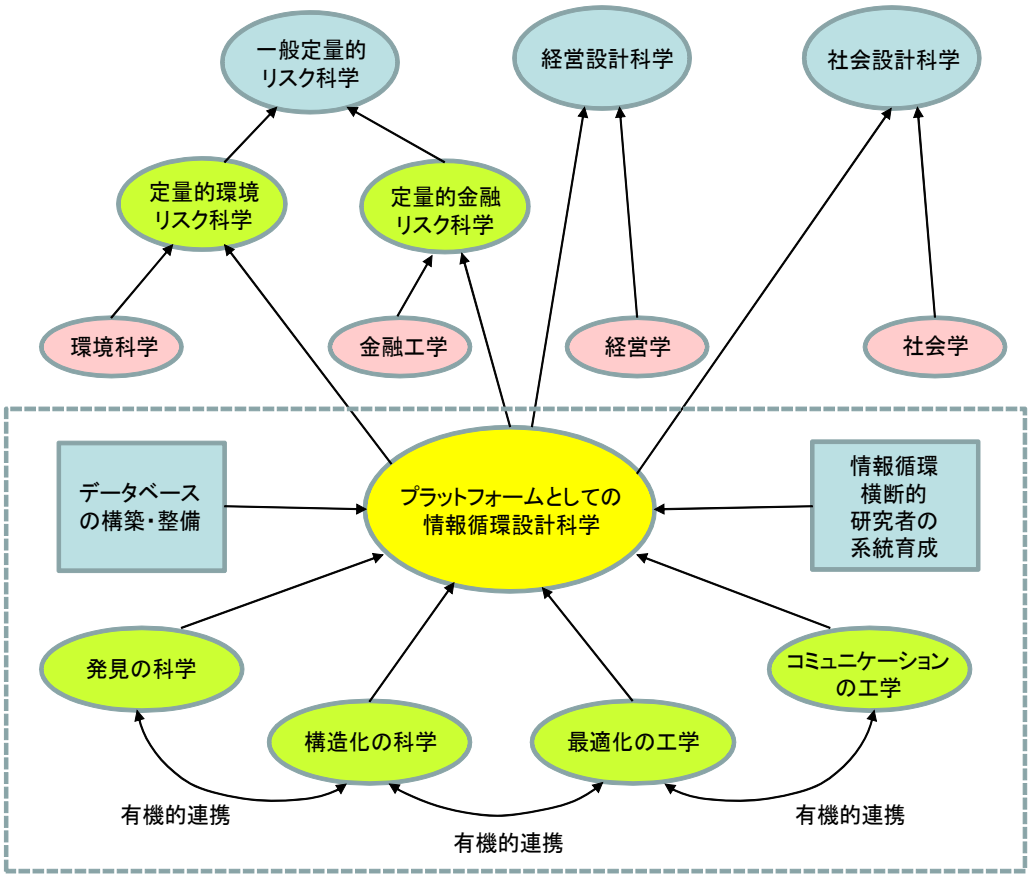

図3.5－３　情報循環設計科学をプラットフォームとした知の統合

改めて重要と考えるのは定量的リスク科学の発展には、対象となる分野にそれなりのデータ収集・蓄積環境が整備されることと、情報循環全般に目配りできる横断的数理科学人材が必要となることである。医薬品の副作用に関するデータベース構築については、我が国は欧米は勿論、韓国にも後れをとっており、社会による社会のための社会からの情報収集と適切な分析と対応による社会改善が実現しない限り、定量的リスク科学の我が国における発展は望めない。図3.5－４のロードマップは、その種のインフラストラクチャーが今後20年以内に実現するものと仮定して作成したものである。

今後、2020年頃までに先ず整備すべきは、既に一定のディシプリンを確立している情報学諸分野、特に発見科学、構造化科学、広義の最適化工学を個別定量的リスク科学創生という目的をトリガーとして融合することである。すなわち、横断的プラットフォームとしての情報循環設計科学の創生作業第一段階の開始である。また個別定量的リスク科学創生は、関連分野に存する物質科学、生物科学、社会科学を基本とした対象に対する知と、これら情報循環設計科学が供給する知の様式との統合、更に、関連する分野に関して構築されるデータベースの支援を基に実現する。一方、定量的リスク科学に裏づけされた意思決

定を社会に還元するためには、リスクコミュニケーションの高度化が必要となる。このため、心理学、情報技術、数理科学などを融合した新情報数理学としてのコミュニケーション工学のグランドデザインが必要である。この作業は、人間ないしはコミュニティの情報に対する応答関数の表現論といった段階から出発し、その設計論に進むまでに概ね 20 年はかかるのではないかと予想している。このコミュニケーション工学が実用化可能となるほどの成熟をもって、プロットフォームとしての情報循環設計科学は創生作業段階から、独自の統合的ディシプリンに基づく発展段階に移行することとなる。2040 年代初頭には、情報循環設計科学に支援される定量的リスク科学も個別的リスク科学の共通要素の水平展開や、何よりも個別データベースを統合したデータアーカイブの構築を通じて、一般的な定量的リスク科学へと進化し、社会全体のリスクを俯瞰することが可能となることが期待される。また、定量的リスク科学に基づく社会改善も政治・経済分野では常識化することが予想される。なお、この新科学創生の潮流をしっかりと支える人材の育成については、長期的に体制が整備されなければならないが、個別定量的リスク科学創生を支援した情報循環設計科学のエッセンスを知る若手研究者が次世代の中核的人材となり、次次世代の学部教育・大学院教育を担当することで、一般社会全体の課題となるリスク問題解決に資する横断的情報学と情報ツールとの適用の力量を有する人材を育成することを目指さなければならない。

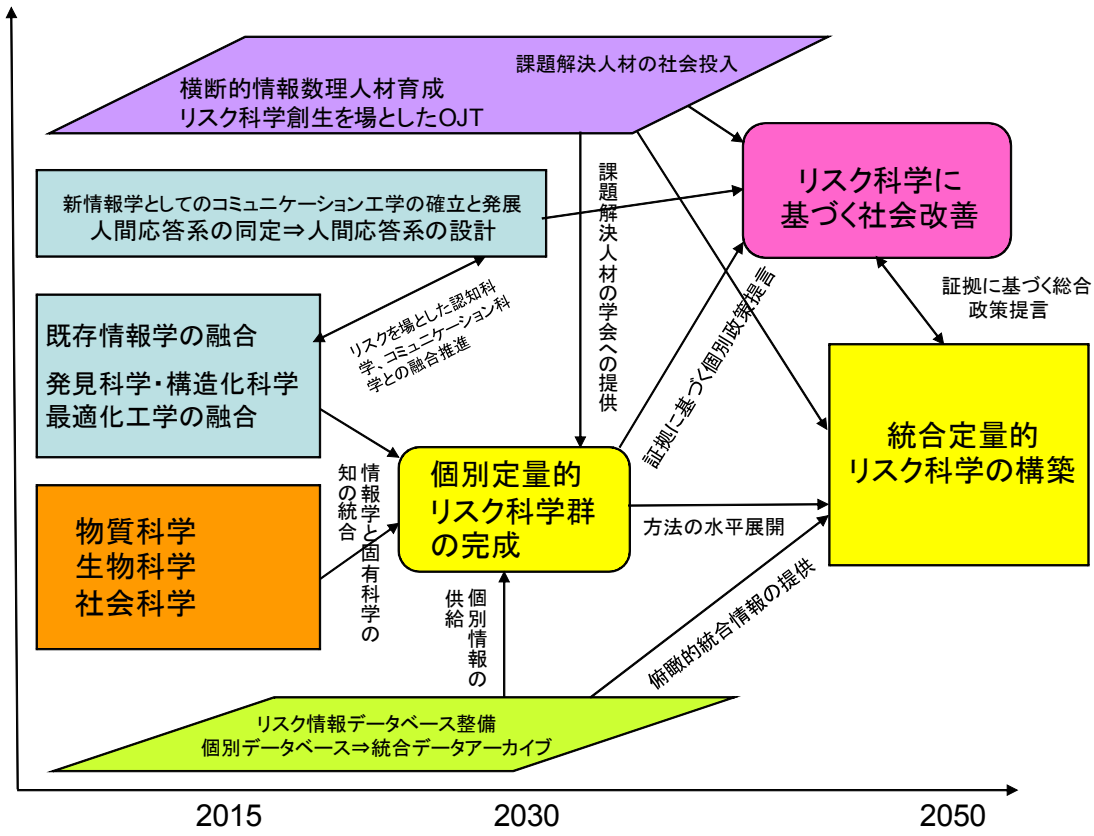

図 3. 5－４　定量的リスク科学創生のロードマップ

３．６　持続可能未来社会デザインのための知の統合

３．６．１　統計科学が提供する知の統合プラットフォーム

20 世紀社会において、科学技術は分野の細分化の繰り返しの中で発展を遂げてきた。したがって科学技術の進展に伴い複合領域は増大し、新領域も次々と創出されてきた。こうした発展は、高度経済成長に象徴されるような、不特定多数を対象とした大量生産・大量消費を目指す成長志向の社会からの要請に呼応したものであるとも考えられる。しかし一方で近年、こうした過度の細分化がもたらした科学技術の弊害も表面化している。各分科における局所的な最適解が、大域的には最適ではなかったり、場合によっては最悪にもなりえる例は多くのシステムや人工物にも見受けられるが、その最も顕著な例は地球環境問題であろう。現在では科学技術や産業の発展と地球環境資源の持続可能性との調和が世界的な課題となっていることは周知のとおりである。一方、情報社会の実現と深化の過程で、20 世紀社会の発展に中心的な役割を果たした不特定多数への大量生産によるサービスの提供方式はオンデマンド・オーダーメイドといった、個に焦点を合わせた方式へとシフトしている。このような 21 世紀社会からの要請に応えるためには、総合的かつ横断的な学問体系、技術体系を軸とした知の統合が必要であることは明白である。そして統計科学・統計技術はそうした学問体系、科学技術のひとつであると考えられる。

統計科学は図 3. 6－１にも示したように、自然科学、社会科学、人文科学に至るまで、あらゆる分野と境界をなしており、その意味では典型的な横断型学問分野である。しかし統計科学の従来の発展の形態はやはり統計科学自体の細分化であり、これまでは共通の手法であっても各分科で独自に研究開発が進められてきた。しかし知の統合を目指す上で横断型分野としての統計科学に求められる役割は、21 世紀社会の課題を解決するために、各境界分野に普遍的に存在する方法論、つまり知の統合のためのプラットフォームを介して、互いの知の互換性を確立し、より普遍的な知の体系の創出を目指すことであると考えられる。またそのプロセスで新たな境界分野を発掘し、新たな価値・サービスの創出を目指すことも必要であろう。

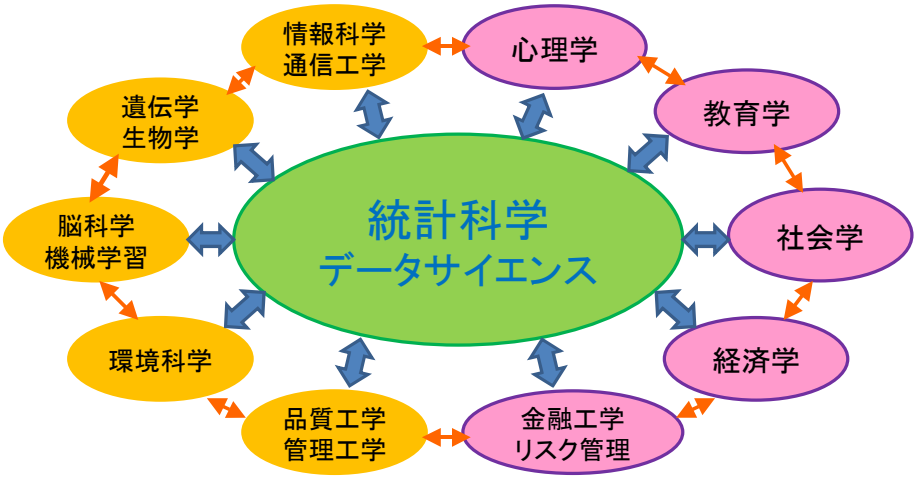

図 3. 6－１　統計科学による知の統合イメージ

統計科学が他の情報科学、数理科学とともに提供する知の統合プラットフォームの中心的な課題のひとつに大規模かつ複雑なシステムにおける統計的推測技術があげられる。これは持続可能社会デザインという観点からは地球・生命・社会現象の分析、予測システムの構築などに必要とされる。また個に焦点を当てた技術という観点からは、創薬、オーダーメイド医療、副作用研究などを目指した遺伝子ネットワーク推定、タンパク質構造推定や、マイクロマーケティングなどで必要とされる。

本節では以下に持続可能社会デザインを例にとり、統計科学が提供する大規模複雑システムの推測技術の研究開発というプラットフォーム（図 3.6－2）を介した、周辺分野との知の統合へのロードマップイメージを作成し、その概要を述べる。

３．６．２　持続可能社会デザインのロードマップ

持続可能社会の実現には、地球上のさまざまな自然現象、生命体の現象、社会現象を詳細に解明していくことが必要になり、その際に大規模複雑システムを用いた統計的解析は重要な役割を果たすと考えられる。大規模複雑システムの推定には高次元データ解析、時系列解析、機械学習理論、データマイニングにおける、状態空間モデル、ベイジアンネットワーク、グラフィカルモデル、離散選択モデルなどの要素技術が主として用いられる。こうした統計技術を用いて大規模なモデルの推測を行う際に直面する共通の課題として新 np 問題(樋口(編), 2007)と呼ばれる問題がある。統計学では一般にデータのサイズを n 、モデルの自由度を p で表す。従来の統計的モデリングでは、モデルのパラメータ数を小さく設計することが推奨されてきた。パラメータ数を増やせば、モデルの記述能力は向上する一方、汎化能力は減少するために予測精度は低下する。そのため従来の推測理論の枠組みでは $n \geq p$ を想定している場合がほとんどであり、実際に推測を行う場合には現実のシステムを大幅に単純化したモデルを用いる傾向にあった。また推測手法の有効性も通常は p は固定で $n \to \infty$ という状況下で評価される。しかし近年において求められる大規模複雑システムにおける p は、ハードウェアの進歩も伴い膨大化する一方である。データ量も巨大化してはいるが、これは主としてデータの次元(p に比例する量)の巨大化であり、観測数 n を一定以上増やすことは技術的な限界や社会的な制約などにより困難な場合もしばしば起こる。つまり近年ではデータが巨大化した一方で、かえって有限標本における安定的な推測手法の開発が求められるという現象が起こっている。

この問題に対するひとつの有力な解決策はベイズ法にある。ベイズ法ではパラメータのばらつきを確率分布(事前分布)で表現することにより実質的なモデルの次元が減少し安定的なモデルの推測を可能にする。またネットワークシステムなどのように、変数間に階層が存在するモデルでは構造的にベイズモデルを想定することが自然な場合もある。ベイズ法によるシステムの推定には事後分布の計算が困難なことが問題点とされてきたが、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)のブレークスルーにより、近年適用事例が自然科学・社会科学の両面で飛躍的に増加している。

一方、尤度に基づく古典論と呼ばれる推論は、新 np の状況では一般には適用ができない。しかし $n \geq p$ ではあるもののモデルの次元 p が非常に高いという状況では、ベイズ法よりもモデルとして自然でかつ実用上有用な場面が数多く存在する。しかしいずれの場合もモデルが巨大化、複雑化したときに、数値的に安定な推定値を得ることが困難になると

いう問題を抱える。またニューラルネットワークや因子分析などの潜在変数モデルでは、モデルが非正則になり、通常の推測理論の適用が不可能なこともある。近年こうした一連の問題に対し、統計モデルの代数幾何的な構造を考察することにより、新たな推測アルゴリズムを提案する計算代数統計(Drton et al., 2009; Pistone et al., 2001)という分野が出現し新たな展開を見せている。これは純粋数学者と統計学者というシーズ側内における異分野間交流によって創出された新領域という意味において注目すべきものと思われる。またここで用いられている代数幾何的手法は、統計学のみならず、最適化・組み合わせ論などの数理工学に横断的に適用可能であり、今後、数理工学の各分野間の知の統合にも大きく寄与していくものと思われる。

こうした推測手法の確立は 10～15 年の間に大きな進歩が期待できる。推測手法が整備されればシステムに関する事前情報が支配方程式や対象に関する専門知識などから十分に得られるような地球規模の自然現象、自然災害の予測、資源埋蔵量予測、環境資源の持続可能性の評価、社会活動のシミュレータなどが実用化されていくであろう。また一部の分野ではすでに実用化が始まっている(Imoto et al., 2002, Nakamura et al., 2006, Ueno et al.,2007)。

しかし現実の問題にはシステムの構造に関する事前情報が少ないために、客観的に最適なモデルを同定するところから始めなければいけない状況もしばしばある。さらにはモデルの同定自体が知識発見として分析の目的となることもある。機械学習モデルの同定やたんぱく質の構造推定、データマイニングなどはその例として挙げられる。

システムの同定はモデルの次元が低い場合には AIC などのモデル選択規準を用いることで行えばよい。しかし高次元のシステムを同定する場合、次元に対して候補となるモデルの数が一般には指数的に増加するため、数え上げに基づくモデル選択規準を用いた最適モデルの同定は組み合わせ論的に不可能である。実際の問題ではデータ間の相関行列が疎であるなどの事前情報が得られるため、それを活用することによって同定が可能になる場合もあるが、一般にはネットワーク構造推定や、因果構造の推定などのモデル同定・システム構造推定に関する研究は未成熟な段階にあると言え、モデルに対して必ずしも現実的とは言えない制約を加えて構造推定を行っている場合も多い。また推定されたシステムからいかにして知識発見を行うかという問題も同種の問題と言える。ネットワークモデルの場合、推定されるモデルが膨大な数のノードを結ぶネットワークであれば、そこから有益な知識発見を行うことやはり組み合わせ論的に困難な問題であると言える。近年、ベイズ的なアプローチや組み合わせ論を駆使した構造探索の研究開発が進められており(鷲尾 et al., 2006)、今後 20～50 年の間で大きな進歩が期待できると予想される。

統計技術の実用化には、システムの推定手法の確立だけではなく、予測結果を有効活用するための方法論を確立することも重要な課題である。予測性能評価、システムの推定性能評価、そしてそれらをフィードバックしたシステムの高精度化はその中の重要な課題であると言える。予測誤差評価、適合度検定、信頼区間などの手法がこれに当たる。こうした手法も複雑システムの場合や新 np 問題の状況下では従来の統計的漸近理論が直接適用できないなどの課題がある。

またリスクの科学的評価と管理手法の研究開発も重要な課題である。統計技術は不確実性に伴うリスクの低減化が実現して初めて意味をなすと言える。リスクが定量化されれば、リスクを軽減させるようなシステム制御も可能になる。リスクという概念は医薬・食品、

環境、金融・保険などの分野では独自に古くから用いられているが、近年不確実性をリスクとする認識が高まったことでリスク自体が多様化しており、その分野横断的な管理手法の確立が望まれている。

複雑システムによる予測技術とその性能評価、リスクマネジメント技術が実用化されれば、シミュレーションを用いた長期予測に基づくシナリオ分析を用いた施策統合、政策提言も高い信頼性で実用化に向かうものと考えられる。そしてこうした技術は今後 10～50 年の間で大きく進展していくことが予想される。以上をまとめたものが、図 3. 6－３である。

３．６．３　まとめ

本節では持続可能社会の構築に向けて、関連する学問分野に普遍的に存在する問題として大規模複雑システムにおける統計的推測を取り上げ、その研究開発を通じて互いに知の互換を図り、より普遍的な知の体系の創出を目指すためのロードマップを作成し、その概説を行った。しかし実際にこうした知の統合を実現するためには、シーズ内、文理間などさまざまなレベルでの学問分野間のコミュニケーション、さらには産学間・官学間のコミュニケーションが必要不可欠になることは言うまでもない。コミュニケーションの推進には俯瞰的な視点を持つ横断型の人材の育成も必要になる。また各レベルに応じた統計教育やソフトウェア開発、学会活動などのインタフェースも必要となり、それを担う人材育成も必要になる。そうした人材育成、インタフェースの整備にインセンティブが働きやすい環境づくりも今後重要になっていくものと思われる。

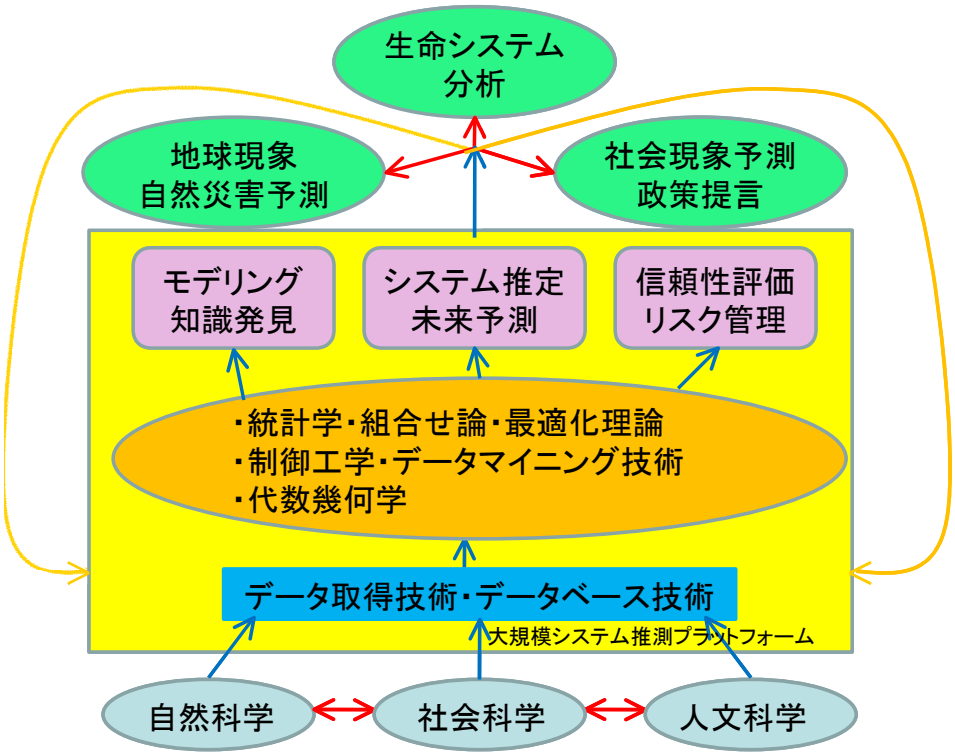

図 3. 6－２　持続可能社会構築のための知の統合プラットフォーム

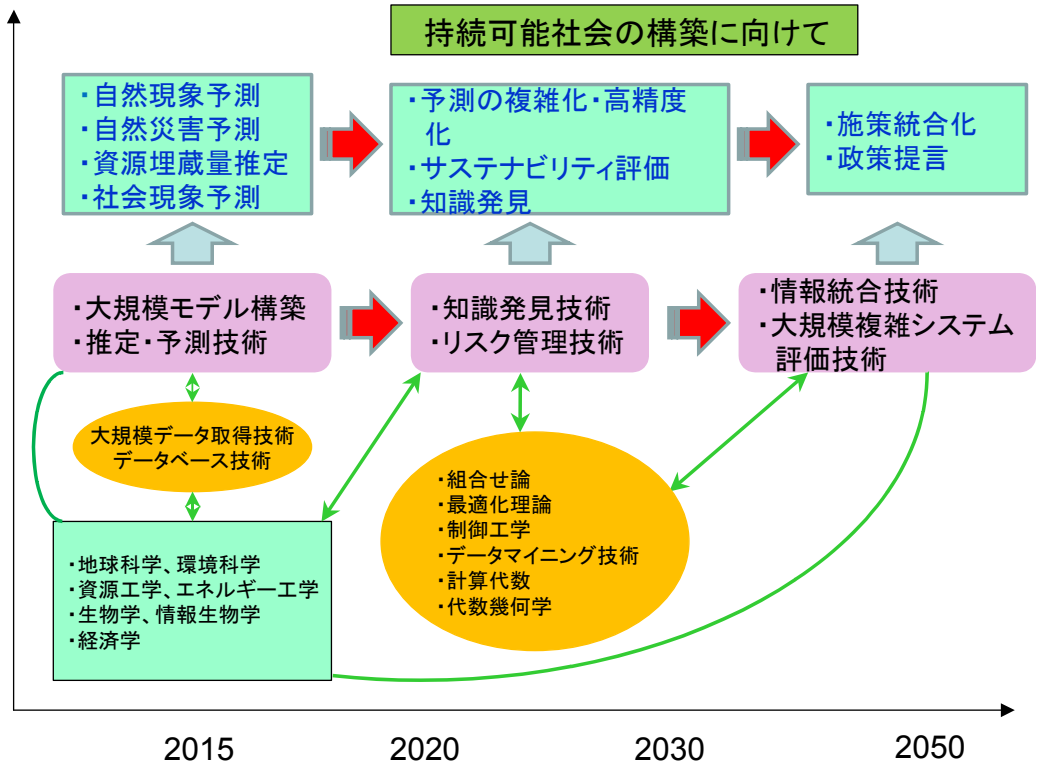

図 3. 6－３　持続可能未来社会デザインに向けたアカデミック・ロードマップ

３．７　低炭素社会の構築

３．７．１　はじめに

「21 世紀環境立国戦略」（2007 年 6 月閣議決定）（環境省，2007）の中で、今後の日本の環境政策の柱として、低炭素社会の構築、循環型社会の構築、及び自然共生社会の構築を統合的に進めてゆくことにより、地球環境の危機を克服して持続可能な社会を目指すことを宣言した。中でも低炭素社会の構築は、近い将来の地球規模での気候変動や温暖化に立ち向かうための中核的な戦略として位置づけられている。

具体的には、ほぼ同時期（2007 年 5 月）に日本政府から提案された「Cool Earth 50」において、「世界全体での温室効果ガスの排出量を現状に比較して 2050 年までに半減する」という長期目標を設定した。2050 年半減の根拠は、様々な気候変動影響に関する研究から、長期的に全球平均で気温上昇を 2℃までに押さえ込む必要があり（それ以上の上昇では甚大な影響が予想される）、そのためには、将来を予測する気候変動モデル研究から全球での温室効果ガスを現状の 50%以下に抑えなければならない、ということが示されたことによる。先進国では、50%よりさらに大幅な排出削減が必要で、日本では 60－80%の削減が必要と見積もられた。

このようにこれまでの研究から、2050 年温室効果ガス排出量半減という目標とその論理的な背景が提示されたが、目標に至る道筋を見出すことは容易ではない。まず、道筋探索の方法論として、目標値を定めてそこに至る道筋を逆に探索する方式（バックキャスティング：BC）が必要となるであろう（図 3. 7－1）。現在から将来に向かって可能な技術や施策を順次積み上げてゆく方式（フォワードキャスティング：FC）では 2050 年に世界における総排出量を確実に半減する道筋を見出すことは難しい。さらに、複数ある採用可能な技術や施策を、世界各国の合意の下で、各国社会に受容できる形で取り入れることが必要となる。この過程では、国際的な合意形成のための手法や、人々の生活習慣を変えるといった社会の合意形成のための手法など人文社会学的な方法論が不可欠となるであろう。

本節では、科学技術の側面から、低炭素社会を実現するための道筋（アカデミック・ロードマップ；ARM）とその実現のための科学技術的なプラットフォームを検討する。

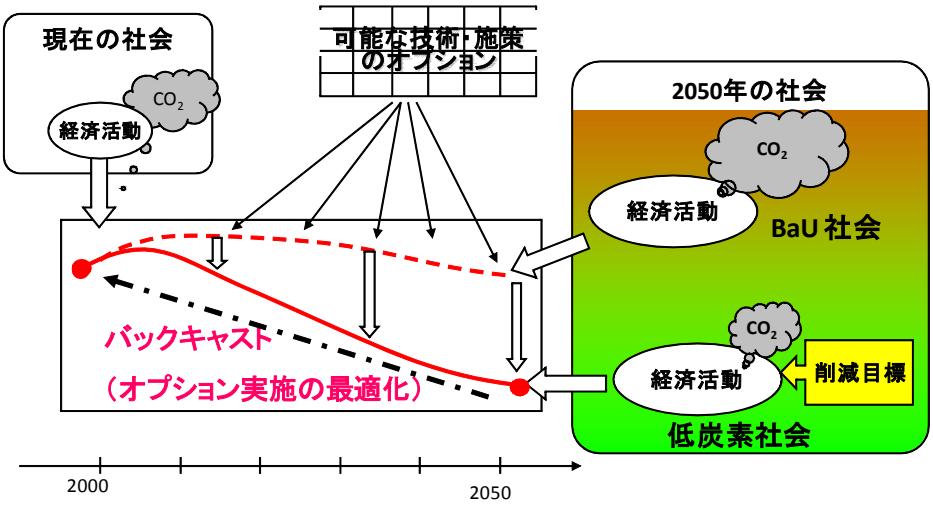

図 3. 7－１バックキャストによる技術・施策実施の最適化（国立環境研究所，2008）

３．７．２　低炭素社会の構築に必要とされる学問分野

前述のように、低炭素社会の構築とは温暖化や気候変動を加速する CO2 や CH4 などの温室効果ガスの濃度を低いレベルに押さえ、その影響を最小限とすることを意味する。このためには、第一義的には、

- 温室効果ガスの排出を抑え（緩和）
- 温室効果ガスによる影響を小さくする（適応）

のための対応策を講ずることが必要である。この分野では新たな環境技術や環境政策が重要な役割を果たすであろう。しかしながら、対応策を効果的に実施するためには、

- 温室効果ガスの濃度やその収支を観測し（観測）
- その循環のプロセスを把握し（プロセス解明）
- さらに、その将来の状態を評価する（予測）

することが不可欠となる。特に、今後は、様々な対策の効果を評価・予測し、その効果を実際に観測することが重要となる。温暖化や気候変動が地球規模での現象であることから、これらの観測から予測、さらに対策までの流れが、地域レベルから、国、大陸レベル、さらに地球レベルまでを対象としなければならないことは云うまでもない。この観測から予測までの流れを実現するためには新たな環境科学、環境技術が必要となる。

ここで注意しなければならないことは、温室効果ガスはもともと、地球上に人間が居ようが居まいが存在するものであり、その収支や循環は、自然起源に由来するものと、人間活動に由来するものとを分けて考えなければならないということである。2007 年に出された IPCC（Intergovernmental Panel for Climate Change、2007 年にノーベル平和賞を受賞）第 4 次報告書（AR4）は、“地球温暖化が人間活動に由来するものである可能性が高い”ことを示した。

現在の温暖化が人間活動に由来する可能性が高い、ということは、低炭素社会の実現は、上記の自然科学や技術的な手段のみで実現できない、ということを意味する。これまでのエネルギー資源や自然資源を大量に消費してより便利な社会を実現するという考え方から、限りある地球の資源をできるだけ効率的、効果的に使う、という考え方に変えなければならない。即ち、人間の基本的な考え方や、社会の在り方を変えなければならない、ということを意味する。この実現に向けては、

- 人間のあり方を考える（哲学、倫理）
- 社会や経済など科学・技術と社会のあり方を考える（法学、社会学、経済学、心理学）
- 社会のあり方を方向付け、そちらの方向に誘導する（政策学）

ことが必要となる。また、世界の国々が協調、連携して対応を進めなければならないことから、

- 国際連携を進める（国際関係論）

ことも不可欠であろう。即ち、人文科学や社会技術も重要な役割を果たすことになる。

低炭素社会の構築のためには、哲学から科学、技術を含む既存のほとんどの学問分野における知および知識が必要であり、その知や知識をどう統合化し、問題解決に向けての道筋を組み立てるか、が鍵となる。

３．７．３　2050 年における環境と社会

気候変動問題は、時間スケールが極めて長い。本 ARM で設定された 2050 年という時点は低炭素社会の構築に向けた一里塚といえる。現在のままのシナリオ（Business as Usual;BaU シナリオ）では、温室効果ガス半減が実現できないことは明らかで有り、2050 年までの ARM では、2050 年における様々な社会や環境の条件（あるべき姿）を設定しなければならない（国立環境研究所，2008）。

（１）国際社会における温室効果ガス（GHG）削減

GHG 排出削減に向けた取り組みが強調して行われ、排出量取引など世界全体での効率的な削減が実施されるとともに、セクター別アプローチなどを通じて、世界全体の技術水準が向上している。さらに長期的には、世界各国が技術を競い合うことで、安定的な削減が安価に実現される。

（２）温暖化およびその影響

排出量はピークを迎えるが、大気中 GHG 濃度は出来る限り低く推移している。ただし、対策により排出量が抑制されたとしても、ある程度の気温上昇が進み、それに応じた影響が発現すると考えられる。

（３）温暖化問題に対する国際社会の認識

温暖化影響の深刻さや深刻になる時期についての科学的知見の信頼性が十分に高まり、国際社会が科学的知見を踏まえて合理的に意思決定出来るようになっている。また、温暖化と他の環境問題や社会問題を同時に解決するためのビジョンが共有されている。

（４）温暖化問題に対する市民・社会の対応

環境税のような施策の導入が一部の国々において受け入れられている。さらに長期的には、情報公開等により、温暖化の外部費用が市場に内部化され、消費行動そのものが大きく変化している。その結果、温暖化対策を全面に打ち出した産業が出現し、経済活動を牽引している。

（５）緩和策をめぐる国際的合意

排出量の削減を目標とした枠組みに世界のすべての国が合意するとともに、先進国は途上国よりも厳しい削減を受け入れている。また、森林による排出・吸収が温暖化対策の国際枠組みに適切に位置づけられるとともに、そのモニタリングが精度良くできる仕組みが確立している。

（６）技術とインフラ、適応策

先進国を中心に新たな技術開発が進展するとともに、CDM[注1]等の制度により、技術の普及が図られている。また、温暖化に向けて社会のインフラも整備が進む。さらに、適応ポテンシャルが地域別に明らかになり、適応策を実施するための技術と資金についても目処が立っている。

2050 年時点でこれらの条件が成り立っていないと、温室効果ガス排出量半減という低炭素社会の実現は難しい。

[注1] CDM：クリーン開発メカニズムと言われ、先進国が開発途上国において技術等の支援を行い、GHG 排出量の削減を増加する事業を実施した結果、削減できた排出量の一定量を支援元の国の GHG 排出量の削減分の一部に充当できる制度。

３．７．４　低炭素社会の構築に向けてのARM

前節での条件設定を実現するために､科学技術は何をしなければならないのであろうか。図3.7－2には低炭素社会の実現に向けて取り組むべき環境研究の課題を学問分野にまとめたARMとして示した。具体的な科学・技術の内容は、3.7.2項で示した

・緩和、適応、観測、プロセス解明、予測などの自然科学・技術と、
・哲学、倫理、法学、社会学、経済学、心理学、政策学、国際関係論などの人文社会科学・技術

とが核となる。以下には、取り組むべき環境研究の具体的な課題を図3.7－2に示された時間軸に沿って整理した。なお、図3.7－2に示したアカデミック・ロードマップにおいて最下段には必要とされる学問分野が示されているが（赤枠で表示)、これらの学問が必要とされる時期は必ずしも時間軸とは対応しておらず、ほとんどの学問分野が左軸に近い現時点で必要となると予想される。

（１）温暖化の実態と影響の観測

温室効果ガスの排出・吸収や大気中濃度、また気候変化、生態系変化等を局所スケールから全球スケールにわたって観測する。また、観測データとモデルの組み合わせにより、観測された変化（生態系等の変化を含む）と温暖化（人為起源強制力）との関係を解明する。

（２）気候・影響の将来予測と評価

モデルの精度を高めるために鍵となるプロセスの集中観測と解明を行う。また、気候モデル、影響モデルの高度化により、将来予測を高精度で行い、また、その不確実性を定量化し、低減する。さらに、影響評価の知見を整理し、社会に分かりやすく伝達する。

（３）排出量の将来予測・削減方策

温室効果ガス排出量を把握するためのインベントリの作成を継続的に行う。そうしたインベントリを基礎として、社会・経済モデル等を用いて、想定されるシナリオ別（人口増加や技術開発、経済成長などによる）に、将来の排出量を定量的かつ定性的に推定する。

さらに、その上で、低炭素社会の実現を支援する施策等を具体的に示す。ここで注意すべき点は、技術や施策の具体的な導入を考える際には、それぞれの時点で、利用可能な技術、施策を予測し、その導入による削減量の予測値、コスト等を考慮したうえで、最適な道筋を探らなければならない、ということである。2050年における目標値から逆算して技術、施策の導入を設計するバックキャスティング手法が重要となる。

（４）温暖化対策社会技術

排出量の削減に貢献するような技術開発だけではなく、社会における受容性、即ち、どのような技術が存在し、どのような政策、制度がそれらの普及を促進するか、普及にあたっての障害が何か、を検討する。また、どのような分野における技術開発が必要となるかを検討する。なお、開発途上の国々への技術、施策の導入を考える際には社会的、法的な受容性の評価が不可欠となるであろう。

（５）温室効果がス削減に向けた国際協調と枠組み作り

世界全体の削減目標と､様々な基準に基づいた分担に対する費用を明確にするとともに、各提案の長所、短所を整理し、国際的な同意が得られる枠組み作りを検討する。

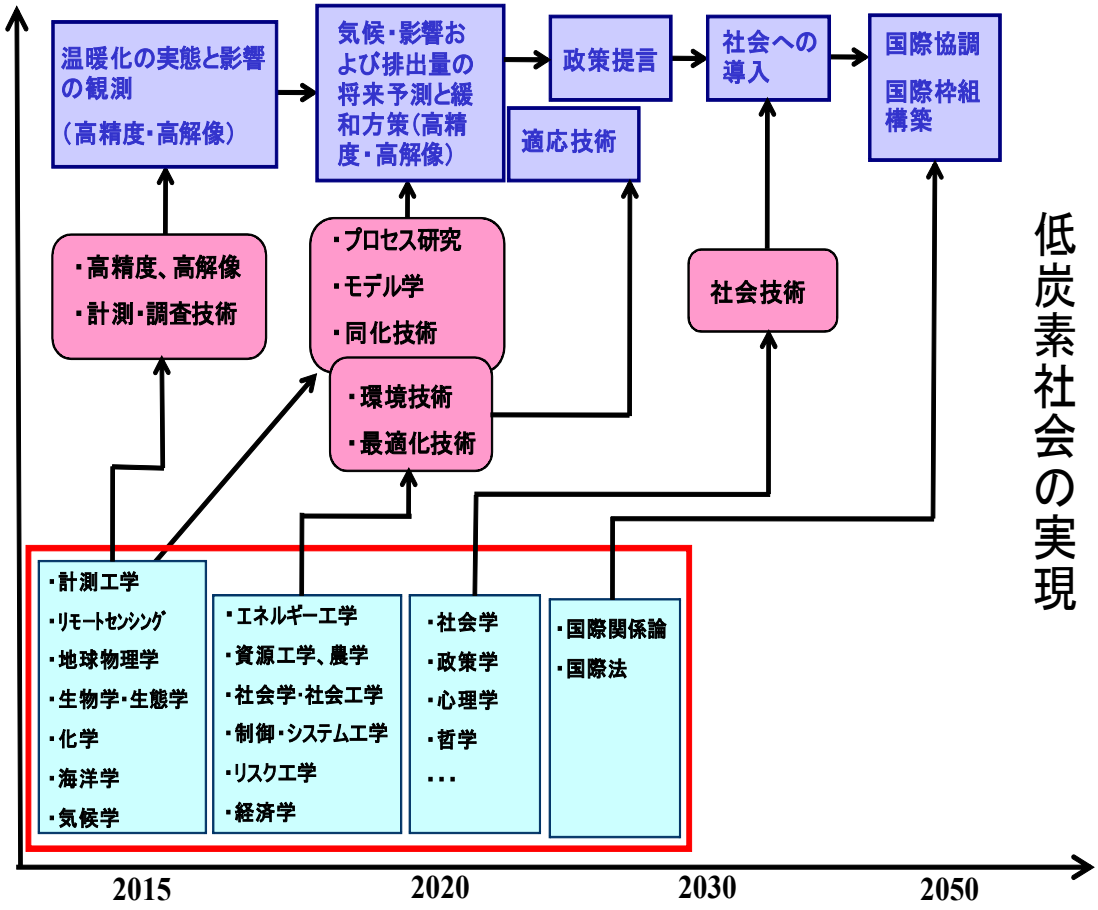

図 3. 7－２　低炭素社会構築に向けてのアカデミック・ロードマップ

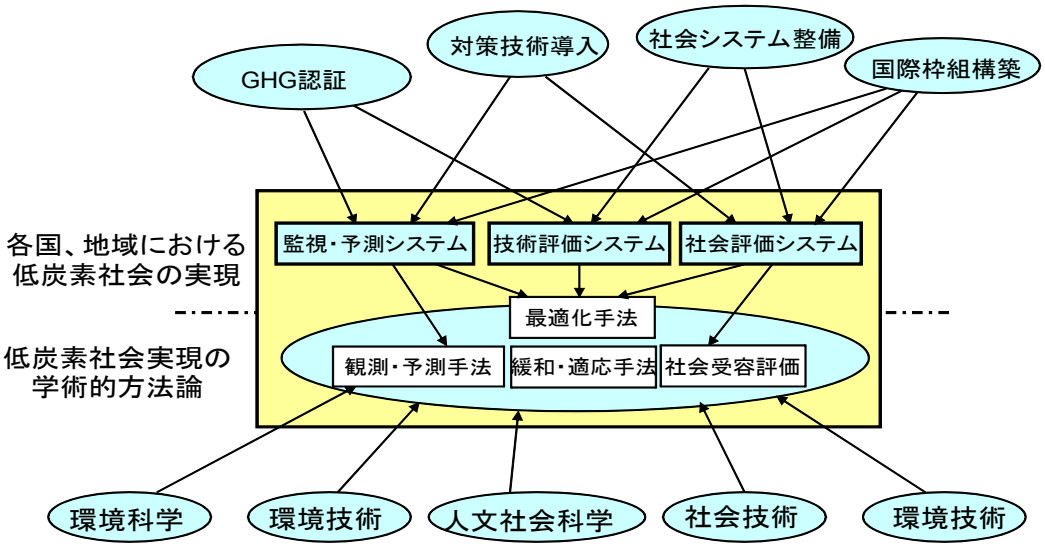

図 3. 7―３　低炭素社会構築に向けた知の統合プラットフォーム

（6）適応研究

温暖化の影響研究とともに、温暖化影響を回避するための適応策の検討を行う。適応策の導入により温暖化影響が回避される損失を明らかにする。また、適応策は地域によっても異なるが、効率的、効果的に適応策を実施するための体系的な整理を行う。

（7）環境負荷の小さい地域づくり、市民による取り組み

排出量の削減をボトムアップ的に実現するための方策を検討する。ハードに対しては、都市基盤整備、集客施設立地、職住配置、地域エネルギーシステム、産業集積、農林業再生等を低環境負荷型に見直した場合の変化の方向性と低減効果を明らかにする。一方、ソフト面対しては、人々の行動の変化をもたらすような情報のあり方、その他の方策について検討し、その効果を明らかにする。また、これらのハード、ソフト両面を実現するための様々な障壁を明らかにするとともに、社会実験等を通じてその効果を具体的に明らかにする。

3．7．5　低炭素社会構築に向けた知の統合プラットフォーム

知の統合プラットフォームの役割は､低炭素社会の実現を目指した具体的な地域や国が、その対象地域でどのような技術や施策の選択を行い、実施後の評価をするか、さらに、その結果を国際的に認証してもらうか､など一連の手順に必要な知見を与えることであろう。図 3.7－3 にその概略を示した。上段には､実現のために必要となる具体的なシステムを、下段には、そのシステムを構築するために必要となる学問的な基盤を表示している。

上段に示した実現のためのシステムでは、実際の監視・認証システム（たとえば、GHG認証[注1]）や、地域的スケールから国際的なスケールまでの様々な枠組みを構築するシステムが必要となるであろう。また、下段の学術的な方法論としては、様々な対策技術や施策のデータベースの構築と、その中からどのような組み合わせを選択するのが良いのかを評価する最適化手法が必要となるであろう。また、観測や予測、さらには対策、施策手法のセットも重要な役割を果たす。

“低炭素社会”はここ数年で使用されるようになった概念であり、その学術的基盤が必ずしも確立していない。そのために知の統合プラットフォームの目的やその構造も明確にはなっていない。今後の検討に期待したい。

[注1] ＧＨＧ認証：　森林によってどれだけの温室効果ガスの削減効果があるかを個別の植林地や林地の単位で評価し、認証すること。公的に認められた認証機関のみが認証行為を行うことができる。

３．８　電子民主主義による社会の構築

３．８．１　社会問題に関する政策形成・合意形成支援環境の構築の必要性

現代の社会は、高齢化社会の到来や地球環境の悪化など、数多くの課題を抱えている。このような状況に対処するには、社会的な問題の発見や解決にあたり、利害関係者間の意見や方策の違いを、民主的に集約ないし統合することが必要となる。

近年の情報技術の急速な発展は、従来、代議制などのように間接的な選択となっていた事態に対し、直接的な選択の機会を可能にすることが考えられる。そこで、個人による直接的な選択の機会を発展させるため、電子民主主義の実現という立場で、情報技術を社会的問題の発見や解決のために活用する方策を模索することとする。ここで、情報技術とは、情報や知識の伝達、処理、蓄積に貢献できる技術である。

この動向は、行政府や企業の情報公開などとあいまって、個人を基盤にした情報や知識の取捨選択、ないしは意思決定が、政策形成や合意形成の基盤となる傾向にあることである。個人による情報や知識の受発信能力の向上は、ボトムアップ的な問題の発見や解決の可能性を向上させている。この能力をさらに発展させるためには、個人の意思決定に要する情報や知識の負荷の膨大さを鑑みると、未整備の状況にある支援環境を整備する必要があることになる。

最近、インターネットを基盤とした CGM（consumer generated media）が台頭し、利用者の問題発見や解決を支援している。具体的には、個人が、Home Page、blog、Social Networking Service (SNS)、YouTube、Wikipedia などを用いて情報や知識を直接的に受信や発信し、問題解決に取り組むことができる。この動向は、既に、情報技術を活用している企業などの組織のフラット化やネットワーク化などにおける変化として表れている。

このような問題発見と解決のための支援環境を整備し、電子民主主義を実現するためには、人文社会科学的知見と理工学的知見とを横断的に統合した知見が必要である。ことに、人間や社会のシステムなどに対する広くて、かつ深い知見が不可欠な前提となる（太田，他，1996；東京大学社会情報研究所編，1999）。いわば、社会規範型の情報技術利用を模索することになる。誤解の無いように付言すれば、社会規範型とは、技術規範型に対置されるものであり、現在の社会を肯定する情報技術の利用を意味するものではない。このような統合の必要性の提唱は、それほど新しくはない。ここでは、この困難な課題に対して、人間や社会のシステムに対する深い理解の基盤と、情報技術の高度化に伴う成果を十分に生かしたアプローチの必要性を提唱するものである。

政策形成や合意形成のプラットフォームは、社会的問題の発見や解決に関する利害関係者間の意見や方策の違いを集約ないし統合する新たな方法を探究するものとして構想することができる。このようなプラットフォームの構築は、民主的な社会の構築における問題の発見や解決の基礎を提供するものである。

これらのことからすれば、電子民主主義の構築は、電子政府（総務省，2005）の次のステップとして目指すべきものである。ここで、政策形成や合意形成の運用や決定事項の円滑な実施を視野に入れるとき、多数決原理に代わる決定のルール、例えば、納得の原理に基づく決定のルールなどを模索することになる。このため、社会的問題の発見や解決の基盤として、個人の意思決定能力や集合知能の向上を図ることが必要となる。

（1）社会問題における政策形成・合意形成支援環境の構築
・社会問題の選択においては、多種多様な利害関係者が存在する。環境問題を例にとれば、温暖化防止、原子力利用、環境開発・保全など、ジレンマ状況に陥る課題が数多くあり、いずれも、何らかの合意形成が不可欠な課題となっている。
・それぞれの利害関係者の選択は、多くの場合両立しないので、情報や知識の提供や獲得はもとより、適切な決定の原理の設定、トレードオフ、ジレンマの解消などの方法を模索する必要がある。
・社会の問題解決能力（集合知能）を向上させるための方策を検討する課題となる。
（2）社会のデザインが課題となっている。
・政策形成・合意形成のための制度設計が課題である。
・情報・知識の提供や獲得問題などにつき、情報開示制度や知的財産権のあり方などが課題となる。
・デザインの選択問題では、ライフスタイルなど基礎的要素を重視する。
（3）理工学分野と人文・社会科学的分野の複合領域となっている。
・理工学、哲学、心理学、社会学、経済学、政治学、医学など多岐にわたる知見を援用し、融合する必要がある。
（4）社会システムと情報システムに関する基盤技術への期待
・社会システムモデルの構築技術や社会システム技術の開発を通じて、参加型意思決定の方法やアクションリサーチの方法などの確立が期待される。
（5）情報システムモデルの構築技術や情報システム技術の開発
・社会規範型の情報システムモデル構築を志向する。

３．８．２　政策形成・合意形成支援環境構築のためのアカデミック・ロードマップ

電子民主主義の理論的基盤は、優れて社会科学的課題である。社会科学的な理論的業績は、いわば偉大な理論家によってなされる場合が目立つ。この領域に関する理論家の例として数例を挙げると、意思決定の領域では、サイモンやマーチ、経済学の領域では、ケインズやサミュエルソン、社会学の領域では、パーソンズやルーマンなどを挙げることができる。この点から考えると、理論の構築についてのロードマップを直ちに描くことは困難であると考えられる。ロードマップとしては、当面、情報技術の発展が貢献すると目される領域に着目し、その展開を記述することとする。

電子民主主義を、情報技術に支えられた選択肢の形成や選択および実施の問題と捉えると、情報と意思決定の領域での問題と考えることができる。情報や知識には、その伝達、処理、蓄積の諸相があり、ことに、政策形成や合意形成の課題などについて、意思決定者のエンパワーメント、利害関係者間の相互作用におけるファシリテータやインフォームドコンセントなどに着目した解明が必要である。

電子民主主義の決定原理では、多数決原理からシフトし、新たな決定原理の探求が望まれる。例えば、納得の原理の検討が考えられる。ことに、選択結果における選択者の選好の反映の程度（富山, 1998）、選択肢の形成や選択過程における個人知能や集合知能の向上などを図る必要がある。以下の項では、これらの課題を例示的に示す。

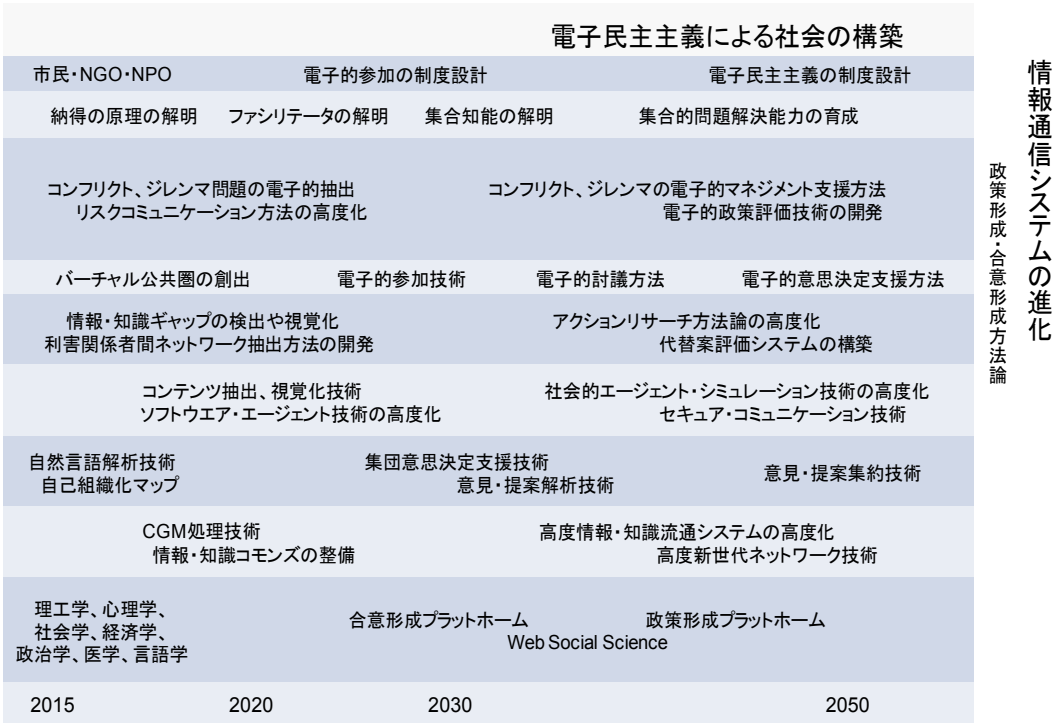

図 3.8－1　電子民主主義と政策形成・合意形成

（1）電子民主主義の在り方の解明
- 電子的参加のあり方を、事例などに基づいて解明する。
- 情報や知識空間であるバーチャル公共圏（遠藤，2005）を創出する方法を解明し、制度を設計する（須藤，後藤，田中，2007）。

（2）非営利組織(NGO)、非営利組織(NPO)を含む利害関係者間連携の在り方の検討
- 投票者の選好を反映できる投票方法を開発する。
- 情報システムによる連携支援環境を解明する。

（3）意思決定支援
- 合理的意思決定モデルから満足化意思決定モデルでの支援へと展開する。
- 不完全情報、不十分な計算能力、満足のレベル、希求水準のレベル、探索の強度、期待の違背への対処などを組み込んだ支援モデルを構築する。
- 階層型意思決定からネットワーク型意思決定への支援のあり方を解明する。

（4）意思決定権限の配分問題、情報や知識の流通問題を解明する。

（5）ジレンマ状況打開方法の解明
- ゲーム、ハイパーゲームによるモデルを構築する。
- 利害関係者間の相互作用とジレンマ問題特性を解明する。

（6）コミュニケーション技術
- 利害関係者それぞれの利害を相互に円滑に伝達する技術の開発やスキルの解明を図る。
- 情報・知識のギャップの抽出技術を開発する。
- リスクコミュニケーション方法の高度化を図る方策を解明する。
- ファシリテータの役割の有効性を解明する。

（7）情報・知識ギャップの充足方法を探究する必要がある。

（8）情報提供・獲得システムの開発

・高度新世代ネットワークの策定を行う必要があるが、社会的コミュニケーションを安全かつ安心して行うことができ、人間関係などの社会的コンテクストを生かしたネットワークを開発する。この基盤として、Web Social Science の構築を図る。

・ソフトウェアエージェント技術の高度化（情報収集志向）により、情報の受発信による社会システムの相互作用を記述できる基盤技術を開発する。

・エージェント・シミュレーション技術（太田, 2006；寺野, 2007）の高度化（動態志向）により、社会システムの動態を記述できる基盤技術を開発する。

・利害関係者間の相互作用に着目し、そのネットワークを抽出する技術を開発する。

・コンテンツ抽出、視覚化技術を開発する。

・　自然言語処理技術の高度化により大量のテキストからの意味抽出技術を開発する。

３．８．３　政策形成・合意形成における知の統合のプラットフォーム

社会的な問題の発見と解決に関する政策形成や合意形成における知のプラットフォームの要件を例示的に示すと、以下のような事項となる。

（1）異分野との連携の必要性

・課題は、部分的には既に固有領域で研究されているが、問題形成・解決の過程に関する知見への統合は困難な状況にある。

・環境問題を例にとると、PI（Public Involvement）[注1]、リスクコミュニケーションの観点から検討がなされており、具体的な便益の計測方法として、ヘドニック法[注2]、トラベルコスト法[注3]、CVM（Contingent Valuation Method）[注4]などが提案されている。

・還元的に要素技術や要素的知見を整理する一方で、これらを統合することのできる方法や観点を開発する必要がある。

（2）知の連携や融合が必要な分野

・方法論的個人主義と方法論的集団主義を統合することのできる知見を必要としている。心理学的知見と社会学的知見の統合は、アローのパラドックスなどの困難な課題を包含しているが、個人と社会の関係を解明する上で、不可避な課題である。

（3）融合によってもたらされるもの

・集合的問題解決能力（Collective Intelligence）であり、多様な利害関係者の下で、問題の発見と解決を図ることのできる能力の生成である。

電子民主主義による社会の構築を構想するとき、政策形成・合意形成における知のプラットフォームは、図 3. 8－2 のように図式化することができる。基盤的には、理工学、心理学、社会学、経済学、政治学、医学、言語学などとともに、情報技術を援用した Web Social Science の構築を図り、集合的意思決定論や情報・知識のコモンズ論の展開を図る。

注1 行政が計画の策定や決定の過程に市民の参画を積極的に求める手法

注2 環境条件の違いが地価の違いに反映されるという考え方に基づき、環境の価値を計測する手法

注3 リクレーション施設などの訪問者の利用価値を、訪問者が支払う旅費により評価する手法

注4 評価対象の財について説明し、その評価対象財を獲得するために最大限いくらまで支払う気があるか（WTP）、ないしはその評価対象財を放棄する場合に最低限いくらの補償を受けたいか（WTA）の回答を得て、財の価値を評価する手法

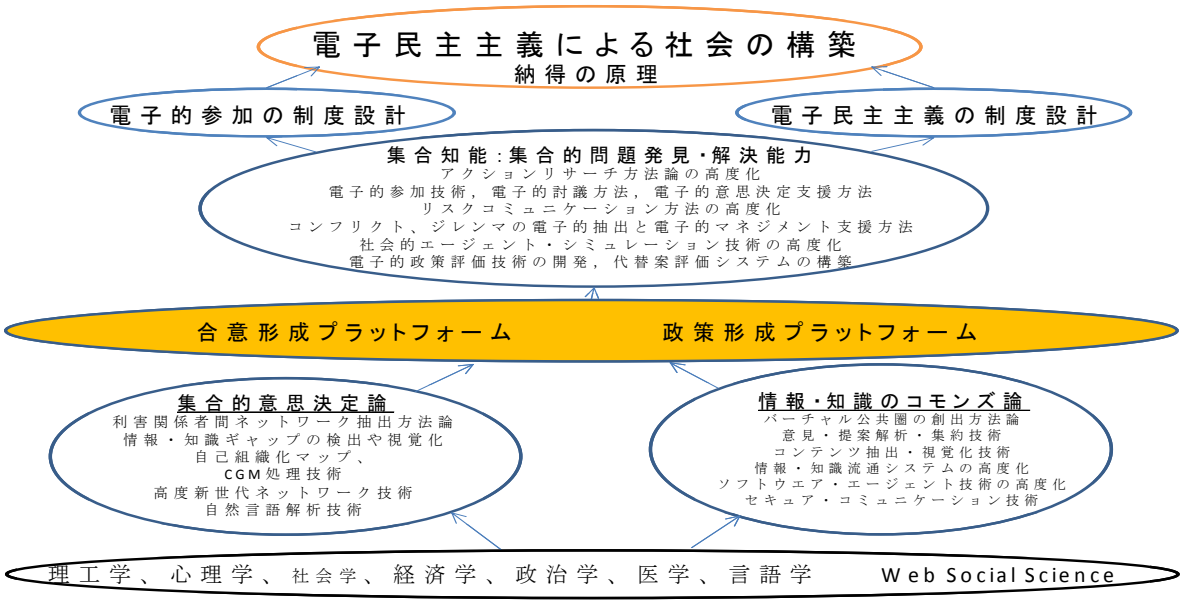

図 3.8－2　政策形成・合意形成プラットフォーム

集合的意思決定論と情報知識のコモンズ論は、政策形成や合意形成のプラットフォームを支える代表的な検討領域である。集合的意思決定論に関し、利害関係者間で張り巡らされるネットワークの抽出や、利害関係者間での情報・知識のギャップの検出は、意思決定の諸前提を明らかにする上で不可欠な分析方法である。また、情報・知識のコモンズは、情報や知識の蓄積や検索の場であり、バーチャル公共圏創出における基盤となる。

集合知能は、集合的問題発見や解決能力であり、知の統合によってはじめてもたらされる能力である。アクションリサーチ方法論の高度化や電子的参加ないし討議の方法の開発は、問題発見や問題解決における有効性に資する。また、社会的エージェント・シミュレーション技術は、リスクコミュニケーション方法の高度化や、コンフリクトやジレンマ状況の電子的抽出あるいは電子的マネジメントに資する。

電子的参加や電子民主主義の制度設計は、このような集合知能を基盤として行われる。電子民主主義による社会の構築は、これらの制度を踏まえることによって展開される。

３．８．４　政策形成・合意形成における知の統合のプラットフォーム構築の推進戦略

（１）個人、研究者、大学、学会、国レベル

それぞれのレベルでのインセンティブ、態度、行動、組織・体制、価値観などを明らかにした上で、個人レベルでは、参加の推進方策、ファシリテータの養成、研究者レベルでは、複合的思考、アクションリサーチの実践方策、大学レベルでは、研究成果流通システムの整備、学会レベルでは、学会間連携の強化、国レベルでは、国際的学術連携の支援などが考えられる。

（２）知の統合を必要とする研究推進の方法・戦略

知の統合プラットフォーム構築のためのメカニズムや方法論の高度化を図る。このためには、アクションリサーチ戦略の確立や、課題、解、参加者、選択機会間のネットワーク化戦略を考えることができる。

３．９　ヒューマン・マシン協働によるディペンダブルな安全・安心社会の構築

３．９．１　はじめに

信頼性技術や安全性技術は年々高まっている。しかし、新しい制御技術や高性能設計の進展は、常に新しいタイプの信頼性問題や安全性問題を生み出している。例えば、集積化に伴う部品点数の増加により、部品に対する高信頼性の要求が生まれ、モジュール内での部品間の相互作用が予想外の問題を生んでいる。モジュール間では、機械系の多くが電子制御となったことにより、機械系と電子系の間の相互理解不足によるトラブルも発生している。エンジンの近くに取り付けられた電子制御機器がエンジンの熱で不具合を起こした例などは、機械系の専門家からすれば容易に想像のできる不具合である。専門分化した複数分野の技術が融合され生まれる製品やシステム内でのトラブルを解消することは、信頼性における大きな課題である。ただし、これら予測の難しい状況に対しては、耐久性の確保に加えて、故障の予兆管理など運用上の保全性を含めたディペンダビリティ[注1]の観点からの総合的なアプローチが不可欠な社会となる。

また、ハードウェア[注2]やソフトウェア[注3]の技術革新は、メンテナンスのミスやユーザの誤使用など、関与する人間との関係の中で安全性を脅かす状況を生んでいることにも眼を向ける必要がある。単に、耐久性のある製品を作ればよい、自動化の進んだ便利なシステムを作ればよい、という単純な発想ではなく、ユーザが必要なリスク認識を継続しつつ安全に使える製品であることが望まれる。さらには、経済的効果を考慮した持続的システムであることも必要であり、関与する人々を含めたトータルなアプローチが求められていると言える。そのためには、心理学や人工知能、経済性工学など、従来の信頼性・安全性工学の枠を乗り越え、多くの分野と融合しながらトータルにアプローチする方法が必要となっている。

３．９．２　知の統合による高信頼度安全な社会実現へのロードマップ

高度に発達した技術の中で、モノとしての信頼性・安全性と保全性とのトータルアプローチ、さらには人間信頼性との問題を含めた対象に対して、どのように総合的にアプローチしてゆくべきか､下記の４つの観点で今後のロードマップを眺める(図3.9－1を参照)。

(1) 人を考慮した製品の高度技術化
(2) 経年劣化時の安全性を考慮した新しい寿命設計法
(3) 多様な環境変動に対応する信頼性・安全性の設計と運用技術
(4) 個人適合型の信頼性・安全性確保（パーソナル化技術・個人対応化技術）

それぞれを詳しく見てゆこう。

（１） 人を考慮した製品の高度技術化

電子技術の急速な進歩により製品の高度化が進み、多様な機能が実現されている。自動化された製品が増え安全装置も埋め込まれるなど、ハードとしての信頼性や安全性は高まっている。しかし、高信頼度化や安全性確保が進めば進むほど、逆に、それを扱うユーザ

注1 ディペンダビリティ：信頼性性能と保全性性能を総合した概念
注2 ハードウェア：固有技術や装置、設備など
注3 ソフトウェア：HWの利用技術、サービスなど

との間にある種の溝ができ始め、新しい問題が引き起こされている。

第一に、故障状況の不透明化が進んでいる。

機械系の故障とは異なり、電子系の故障は、機能低下や機能停止などの目に見える形で

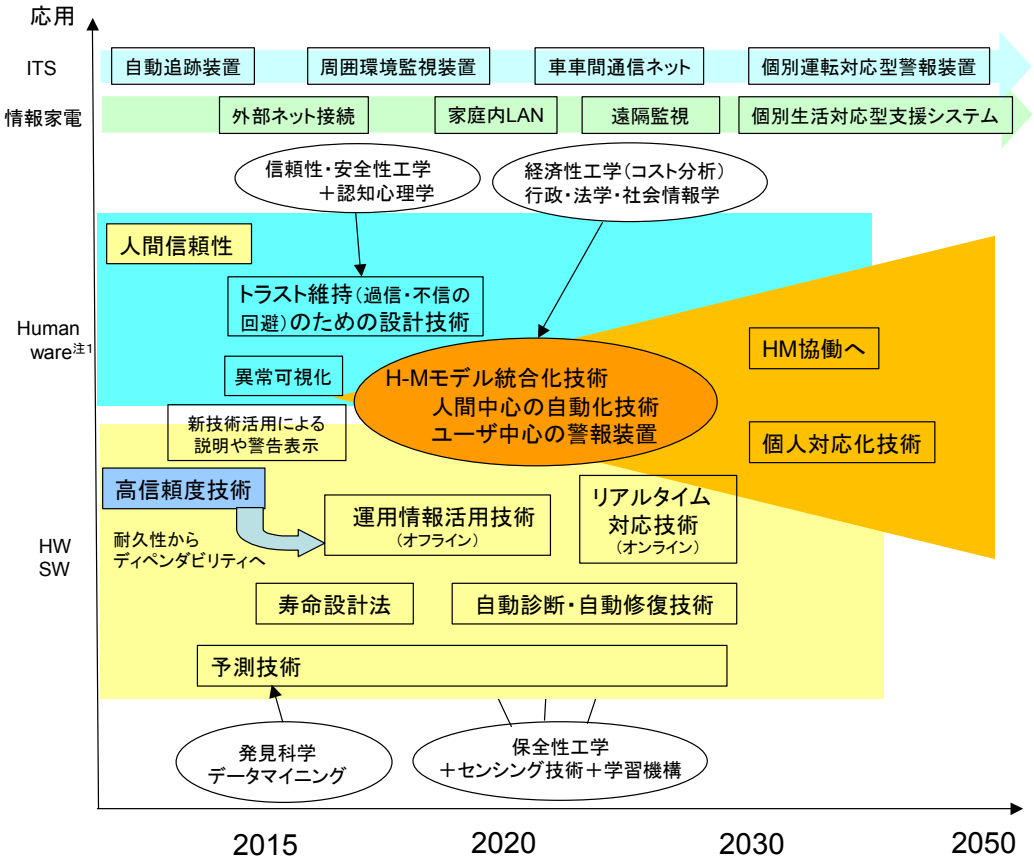

図 3.9－１　高信頼度な自動化技術による安全社会実現へのロードマップ

現れなければユーザには発見が難しい。故障箇所の同定は、メンテナンスの専門家でも難しい場合が少なくない。これらに対しては、例えば次のような技術の導入が必要となる。

① 異常可視化の技術導入

ユーザが異常認知を可能になる方法として、可視化技術による「異常発生の見える化」の積極的な導入がある。情報家電では、家庭内ＬＡＮの導入により異常発見の管理が容易になり、さらにはインターネットを利用した遠隔監視の仕組みも可能となる。

② 自動診断や自動修復の開発

メンテナンスの必要性を最小に抑えるためには、自動診断や自動修復のメカニズムの開発が不可欠となる。ソフトウェア分野でのフォールトトレラントや自動修復の技術は既に定着しているが、同じ要求が、様々なハード製品においても期待される。ただし、製品内部での自動対応が過度に進むと、人の対応能力が落ちてしまうなどの、いわゆる「自動化

注1 Human ware ヒューマンウェア：ユーザに関する性質など

の皮肉」(Bainbridge, 1983) の現象が引き起こされ、長期的な観点からは必ずしも望ましいことには注意する必要がある。

第二の問題は、ユーザ側に発生するトラストの低下の問題である。

機能不具合が皆無になりつつある高信頼性製品では、ユーザは過信に陥り易く、注意が散漫になるなどの弊害が生じ易い。一方で、一つの小さなトラブルが大事故に繋がるとトラストが急激に落ちることや、トラブルの発生回数だけではなく連続したトラブル発生により不信に陥り易いなどの不信を引き起こすパターンが存在することが既に分かっている。これらに如何に対応するかは、製品設計・システム設計でも大きな課題である。

特に、「安全装置の採用により安全性を高めても、それがリスクテイキングな操作を誘発し、結局リスクは下がらない」という人間の「リスクホメオスタシス」の傾向が知られており、これは、リスクを下げるのはハード的な機器ではなく、それを使うユーザ自身であることを意味している。したがって、ある程度のリスクをユーザ側に残して、危機意識をもって製品を使用させることが望ましい場合もあるということになる。例えば ITS(高度交通システム)では、ACC という車間距離を一定に保持する自動システムがあるが、過信を回避するためにほとんどのシステムでブレーキ操作は自動化せずに運転手の役目としている。安全装置が起動したことを体感させる仕組みも取り入れられている。家電製品でも、すべてのリスクをフールプルーフなどで設計対応するという指針ではなく、リスクをユーザに喚起し正しい認知、行動を促す仕組みを取り入れるなど、人間の能力を活用する設計技術が期待される。このようなトラストを維持し、過信・不信を引き起こすことのない設計技術の獲得は必須となる。

これらは「機械に人間を合わせる時代」から「人間に機械を合わせる時代」への変移であり、人間中心の自動化技術を中心とするヒューマン・マシン協働のための HM モデル統合化技術の確立を目指すものである。

（2） 経年劣化時の安全性を考慮した新しい寿命設計法

高信頼度な製品が増加する中、メーカの想定以上に長期使用し、不十分なメンテナンスにより問題が起きるケースが増えている。実際、メーカの想定をはるかに超えて 30 年以上使用していた扇風機が火災を起こすなどのトラブルが発生している（2008 年）。

消費生活用製品安全法の改正（2007 年 5 月）により、火災事故など重大事故の報告が義務付けられたが、その報告義務に製品の使用年の制限がない（使用している限りは対象）ことから、経年劣化に対するフェールセーフ設計が求められ始めた。従来から、偶発故障に対するフェールセーフ設計は考慮されていたが、経年劣化に対する考慮は無かった。信頼性技術が進歩し高信頼化が進む中で、寿命をどのようにコントロールすべきか、フェールセーフ設計をいかに取り入れてゆくべきか、などの観点から新しい寿命設計手法の確立が重要な課題となっている。

同時に、ユーザによる協力も不可欠であり、ユーザに対するメンテナンスの必要性表示や作業容易性などが求められる。従来の取扱説明書の記述に留まらず、新しい情報技術を活用した情報提示方法も考える必要がある。情報家電では、インターネットとの接続によりリコール情報を自動収集するなど、ネットワーク技術とのコラボレーションによる新しい情報共有の仕組みが期待される。

（3）多様な環境変動に対応する信頼性・安全性の設計と運用技術

使用法や使用環境が目まぐるしく変化するなど、現在の延長上にはない状況を予測し、対応することが求められ始めている。例えば、シュレッダーに子供が指を挟まれてけがをした事故は、仕事環境がオフィスから一般の住宅内居間に広がり、事務用機器の周りを小さな子供を走り回るという従来とは全く異なる新しい環境で発生した事故である。従来の信頼性工学は、統計的データ解析手法を中心とした信頼性解析やリスク解析が実施され、それらは現状の延長上の中で、品質の変化や特性値の変化を追究し予測するものである。しかし、統計手法では難しい使用環境の不連続的な変化が製品に及ぼす影響を予測することが求められており、従来の延長ではなく新しく発生することを予測するための手法技術が必要になっている。

また、これまでも、多くの企業がクレーム情報やヒヤリハット情報などを集めて活用しようとしてきたが、未だ不十分である。収集には力を入れてきたがそこから如何に情報を抽出し、設計開発にフィードバックするのか、新しい活用手法の開発が期待される。現代のように使用方法や使用環境が多様化する中では、事前予測には限界があると考え、GPSやインターネットなどの新技術を活用し、予測を補う運用情報活用方法の開発に力を入れるべきである。既に行われているエレベータの遠隔監視の一般家庭での情報家電への拡大も可能性がある。さらに、リアルタイム（オンタイム）で使用状況をモニタリングし、迅速な対応を実現するシステムも新技術と管理システムの仕組みの導入などで可能になる。これらのネットワークは、メーカとユーザ間の情報共有であるが、ITS における車車間通信のように、ユーザ間での情報共有技術の進展も安全・安心操作につながる。

これらにより、運用開始後の情報を基に様々な環境に適合できる製品やシステムが開発されることが期待される。

（4）個人適合型の信頼性・安全性確保（パーソナル化技術・個人対応化技術）

電子機器の小型化、高性能化は、運用情報の収集、学習などを可能にしつつある。そのような中で、ユーザの生活パターンや性格に対応した製品が登場することが期待されている。例えば、警報装置は現状では全て一律に設定し埋め込まれている。交通システムを考えても、信号機は全ての人に共通のシグナルを同じタイミングで提示するが、運転者のブレーキ反応速度に合わせて信号を出すシステムがあってもよい。実際、人によりブレーキ反応速度は異なり、特に高齢者の場合には個人差が大きくなる。したがって、反応速度の遅い人には早いタイミングで警報信号や衝突警報を送るなど、その人の運転の癖に適合したメッセージを送ることができれば効果が高まる。このような個別運転対応型の警報装置や運転支援装置は、情報家電での個別生活対応型警報や支援システムでも実現可能である。通常の生活パターンを自動学習し、その知識に基づき自動支援するシステムなどは、高齢社会、福祉社会には重要な技術となる。

３．９．３　HM 協働による安全性獲得のためのプラットフォーム

前項で述べたように、信頼性や安全性は、ハードやソフトの技術だけに頼るのではなく、運用段階での保全情報の活用やユーザの適切な対応が必要となり、そのためのヒューマンーマシンの協働活動によって獲得されるものである。それは、ヒューマンマシンモデル融合化技術を核とした知の統合で初めて得られるものである。

（1） 人を考慮した製品の高度技術化

故障状況の不透明化を回避するための異常の見える化技術は、例えば、溶液の劣化を色の変化で発見できるなどのインテリジェント材料ですでに実現された技術である。さらなる領域での見える化のための技術開発が望まれる。また、自動診断や自動修復は、制御・計測、機械分野の技術に、電子技術を駆使したセンシングや人工知能分野で検討されている知識獲得、学習などの知識処理技術の融合が必要となる。

ユーザの過信や不信などのトラストの問題を回避するためには、「安全装置が付くと人は行動を変える」ことまでを考慮した安全性設計を実現することが必要である。そのためには、認知工学や認知心理学、行動科学などの知識を信頼性分野と融合し、工学的な意味で何ができるかだけではなく、人の認知や感情がオペレーションにどのような影響を与えるかなどを積極的に検討することが不可欠である。安全装置が如何に安全を確保できるかではなく、安全装置をつけた機器を使う人がどれだけ安全に使うようになるか、使用者の行動予測なども含めた高信頼性・安全性の製品設計開発アプローチの方法論が必要となる。

これら HM モデル統合化の中では、人の役割分担を明確にするとともに、経済性工学の観点から持続可能性を追求することも忘れる訳にはいかない。最低限の安全性獲得の仕組みはコスト度外視で必要だが、余りにも高価な自動安全装置では社会に受け入れられない。

（2） 経年劣化時の安全性を考慮した新しい寿命設計法

経年劣化に対するフェールセーフ設計を中心とする新しい寿命設計法の確立は技術的課題だが、ユーザによる協力も不可欠であり、定期的な点検の社会普及などを同時に検討することが必要となる。ユーザに対するメンテナンスの必要性表示や作業容易性などを実施するためには、従来の取扱説明書の記述に留まらず、新しい情報技術（IC タグやモバイル機器など）を活用した情報提示方法も考える必要がある。ユーザ側のメンテナンスの重要性に関する認識を高めるために、社会の仕組みの整備も考える必要があり、定期的点検が定着するための行政による法規制のあり方と共に、正しい使い方、安全な使用法の普及など社会教育や安全情報の企業発信など、安全情報の共有化、リスクコミュニケーションも重要な課題となる（田中, 2008）。リコールに対するユーザ意識の植え付けも考えるべき課題である。技術者には、技術的知識に加えて、このような社会的な影響やユーザ観点からの検討ができる眼が要求される。

（3） 多様な環境変動に対応する信頼性・安全性の設計と運用技術

状況の不連続的な変化を予測し、新しく発生することを予測するためには、発見科学と言われる分野の発見的手法、社会傾向予測なども含めた使用環境予測、シナリオ分析などを積極的に取り入れ、従来の信頼性工学や安全性工学の中に新しいタイプのアプローチを導入することが必要となる。

また、クレーム情報やヒヤリハット情報を含め稼動状況などの運用情報を活用するためには、センシング技術の発展と共に、大量データを迅速に解析するためのデータマイニングなどの情報科学的手法を利用した方法論を構築してゆく必要がある。既に運用情報の活用例として、グローバル化し全世界を対象に活動している建設機器のリース会社が GPS により位置同定と共に衛星回線を駆使して活動中のリース機器の使用状況をモニタリングし、メンテナンスや異常状況把握に活かしている例がある。この方法はリアルタイムに予兆現象を発見し迅速な対応に結びつけるなど、さらなる技術発展が期待される。GPS は屋

外だが、屋内機器のモニタリングではインターネットなど情報技術を駆使した運用状況のリアルタイムモニタリング技術が望まれる。オフラインでの運用情報の蓄積と活用から、さらにはオンラインでのリアルタイム対応も視野に入れた、信頼性・安全性への新しい対応技術の開発が期待できる。

（4） 個人適合型の信頼性・安全性確保（パーソナル化技術・個人対応化技術）

個人対応技術を獲得するためには、ユーザの生活パターンや操作特徴などを情報収集、データマイニングなどのデータ解析、学習機構などを駆使して、そのパターンを発見することが必要になる。多くの電子機器の小型化、高性能化による運用情報の収集、人工知能技術による学習、など多くの技術を結集して初めて個人対応技術は可能になる。

センシング機能の高度化と学習機構の開発が安全性技術とコラボレートすれば、ユーザディペンドな警報発信や故障予測を実現できる可能性がある。同じ機器を使用するにしても、ユーザによりヒューマンーマシンでの役割分担が変わるパーソナル化技術は大きな課題である。

３．９．４　安全・安心な社会に向けて

以上のように様々な工学分野の融合として製品化が進む中、総合的に工学・技術的な観点から高信頼性設計や安全性設計を進めると共に、ユーザの使用状況・使用環境を取り込むことを可能にした製品・システムの開発が社会の安全・安心生活に貢献する。人が受身として安全を享受するのではなく、人が安全獲得の一部に参加する形でヒューマンとマシンが協働することにより高信頼化や安全性を確保するという方向性が望まれる。

消費用生活用製品、ITS に代表される自動車の運転支援装置、情報家電など、市民の生活に密着する多くの機器における安全性の確保は、ユーザをパートナーとして巻き込む方法で実現されるべきであり、その中で安心した充実生活が可能になる。

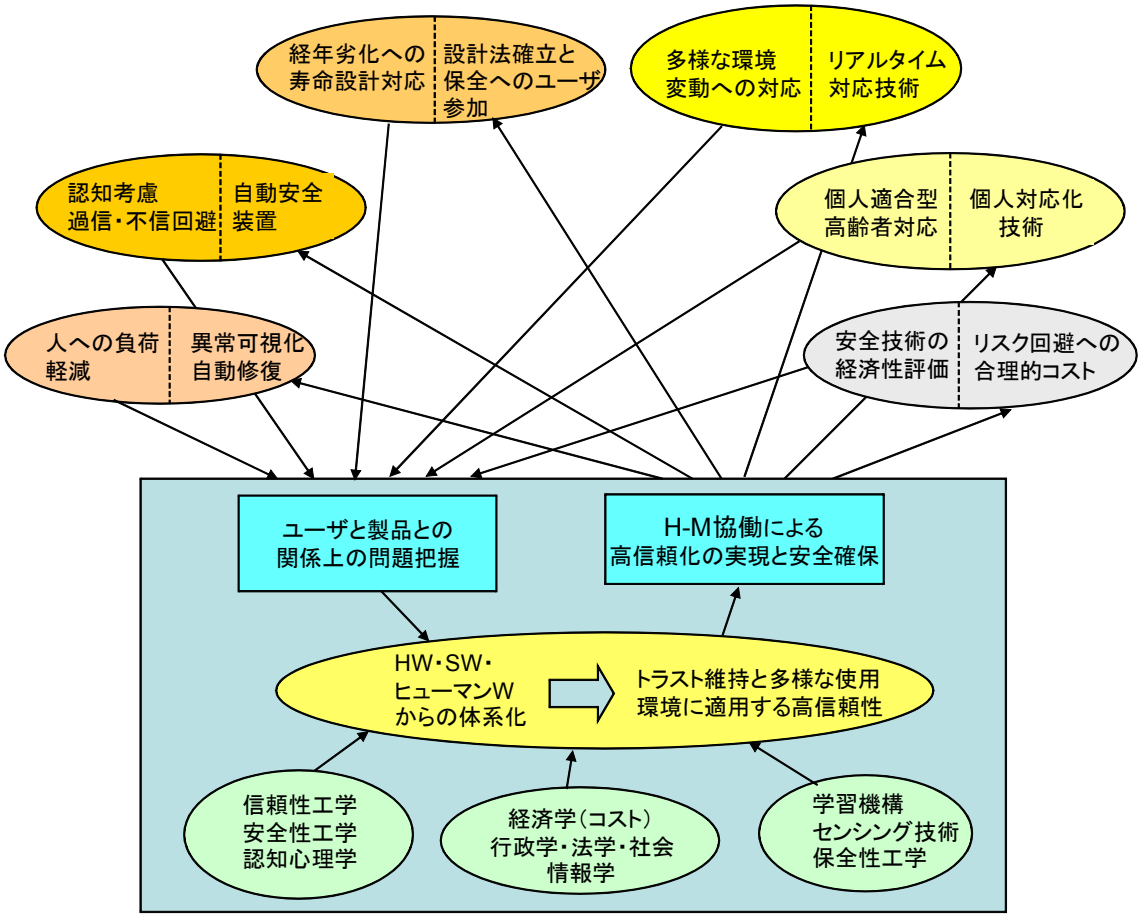

図 3. 9－２　ヒューマン・マシン協働を目指す統合プラットフォーム

３．１０　ロボティクス基盤高信頼社会の構築

３．１０．１　知の統合の必要性とその契機

ロボット先進国の責務として、わが国では、高度なロボットの開発とともにその基盤技術活用の方向性を示すこと、そこで必要な技術的要素のロボットとしてのシステム統合の方法論を提示することが求められている。また、一方で、ロボットが活躍する未来社会の制度設計を先取りできる予見社会科学と、ロボティクスによる人間･社会へのサービスや、人間能力の拡大が社会構造にもたらす変革の意味を追求する人間科学を確立して、安心で信頼できる社会の実現に至る道筋を設計することも必要である。本構想では、これに応えるべく関連の知を統合する。これは旧来の縦割りの学問体系の寄せ集めとは一線を画し、横断型の学術分野として「安心・安全、信頼性」という社会にとって最も重要な価値に直接的に貢献する文理の領域を統合する試みである。その主要な目的は下記の 2 つである。

（1）文字通り「社会基盤となるロボティクス」の構築、すなわち、「より良いロボットを作るロボティクス」から、「より良い社会を作るためのロボティクス」へと、ロボティクスの学術的価値を。人間・社会を対象とした科学技術へと転換を図る。

（2）文理の分野を横断する基幹科学技術の推進と振興による知の統合への道筋を確立する具体例を、社会基盤ロボティクスという新学術領域にて実証する。

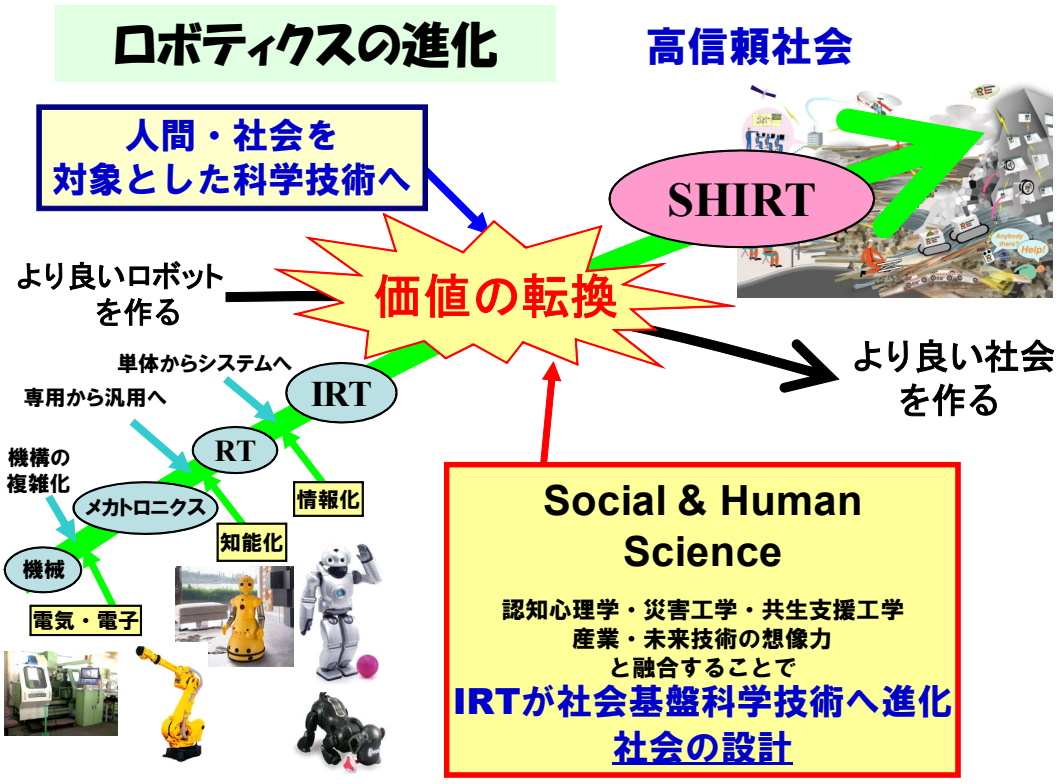

図 3. 10－１　ロボティクスの進化と高信頼社会の基盤技術への転換

ロボティクスを基盤とした社会構築は、実際の生活弱者に対する支援から、産廃処理、地震その他の自然災害からの復旧現場支援、建設・土木作業支援などに代表される特殊環境における技術・作業支援、交通、電力など社会インフラストラクチャーの管理保守支援など、人間社会におけるロボットの活用の仕方を広く包含する。これは、図 3. 10－1 に示すように、「より良いロボットを作る」というロボティクスから、「より良い社会を作る」ためのロボティクスへと、人間・社会を対象とした科学技術への価値の転換を図るものである。

そこでのキーポイントは、細分化された知を統合し、社会の安心・安全、信頼性といった社会にとって最も重要な価値に直接的に貢献する課題の解決へと昇華させていくことにある。具体的な文理融合による研究の実現例を提示することにより、学術水準の向上・強化につなげていく。

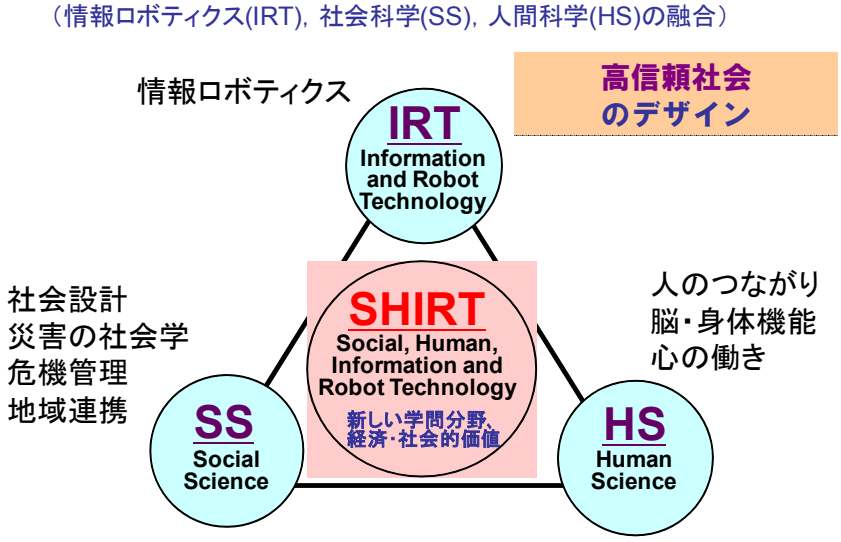

図 3. 10－２　高信頼社会のデザインを支える知の統合の枠組み

３．１０．２　知の統合のプラットフォームの役割

人々が安心して暮らせる安全で信頼感を持てる社会を実現するため、

(A) 情報ロボティクス(IRT)とそれを活用するための社会科学(SS)、人間科学(HS)とを統合した基盤科学技術（SHIRT）を新たな研究学術領域として創成する（図 3. 10－2）とともに、

(B) これらの個々の「科学･技術」の要素研究に加えて、人間・社会・情報ロボティクスを広く俯瞰してロボティクスを基盤とした「高信頼社会システムづくり」の方法論を確立する、を目的とする。このため、次の３つのロボティクス活用場面を縦軸として想定する。

(1) ロボットを活用した建築・土木作業、地震などを含む広範な自然災害や事故、テロなどの人為災害において災害被害を最小限に抑える減災・レスキュー、宇宙や危険箇所での作業などの「安全社会の確立」、

(2) ロボットが少子高齢化を迎えた社会で人間の生活を豊かにするために有効なサービスを実現する体制を設計し、活用する人間・社会への「安心の創成」、

(3) ロボットが人間の能力を補完して、社会的役目の一部を担う「人間能力の拡大」。
これらの場面におけるロボティックスを社会基盤として成長させるための基盤研究として、
(a) 要素・デバイス開発、
(b) ロボットとしてのシステム化、
(b) 社会・人間への寄与、
を横軸として、3×3 のマトリクス構造（図 3. 10－3 参照）の各交点に既存学術分野を配置する。すなわち、この 3×3 の有機的なマトリクス構造が、本構想におけるプラットフォームにあたる。

このプラットフォームもとで、高度なロボットの開発とその社会での活用の方向性を示し、また一方で、ロボティクスと協働した未来社会の制度設計を先取りできる予見社会科学、ロボティクスによる人間・社会へのサービスや、人間能力の拡大が社会構造にもたらす変革の意味を追求する人間・社会科学を確立する。

３．１０．３　知の統合を推進する具体的な研究内容

本構想で具体的に研究を推進する内容は、以下である。

（1）安全社会の確立：

減災・レスキュー活動に必要不可欠な要素技術を調査分析し、それらをロボットデバイスとして研究開発したうえで社会での運用方法を検討する。また、実際に危険なフィールドにおいて人に代わって仕事をするロボットをフィールドテストすることにより、安全社会実現のためのロボットシステムの構築を目指す。それと並行して、ロボットの社会への浸透とその影響波及による社会のあり方の変容について、科学的予測の方法論と社会への正の影響を最大化するためのシステム設計論について研究を行うことにより、「安全社会の創成」を目指す。

（2）安心の創成：

五感の中でも最重要かつ未開拓な部分の残る視覚と聴覚について、インタフェースの基盤となるメディア技術の開発を行い、ロボットが人間と物理的な接触を伴い作業や支援を行う場合において頼れるロボットを研究開発する。さらに、幅広い疾患の早期検知を行い迅速な医学的対応・処置を可能にする医療用ロボティクスを開発することにより、人間生活における「安心の創成」を目指す。

（3）人間能力の拡大：

さまざまな「人間を支援する技術」において、人間自身の能力が拡大されたかのように扱える自在性を持った技術とその実現のための要素・デバイスを開発する。また、人間を超えた能力が必要とされる微細作業、精密作業、力作業、高速移動などをロボットが担い、高度な判断が要求される部分は人間が行う人間支援ロボットシステムを構築する。並行して、ロボット技術を活用した装置の導入によってもたらされる人間能力の拡大が、高齢者・障害者の自立支援ならびにそれをサポートする介護士らの支援におよぼす影響について、リスクアセスメントの方法論とそのツールを開発する。

３．１０．４　ロボティクス基盤・高信頼社会構築への知の統合ロードマップ

ロボット技術の発展は社会基盤を支えるための数々の基礎技術を産み出し、個々のロボ

ットがさまざまな社会サービスを実現できる土壌が整ってきた。一方で、人々が安心して暮らせる安全で信頼感を持てる社会を、ロボット技術を基盤として設計する方法論、そのためのロボット技術のインテグレーション、実システム化ために不可欠なロボット技術の機能と現場適用性、ロボットと人間が共存するための法律論などについては、学術的観点からの検討が著しく遅れている。

すなわち、本構想では、ここのロボット技術がどのように進化・融合して、高信頼社会の基盤技術へと知の統合化を成し遂げるのかを明確なロードマップとして提示することが重要である。その観点で、過去 50 年から将来の 50 年を見越したマップを描いたものが、図 3. 10－4 である。

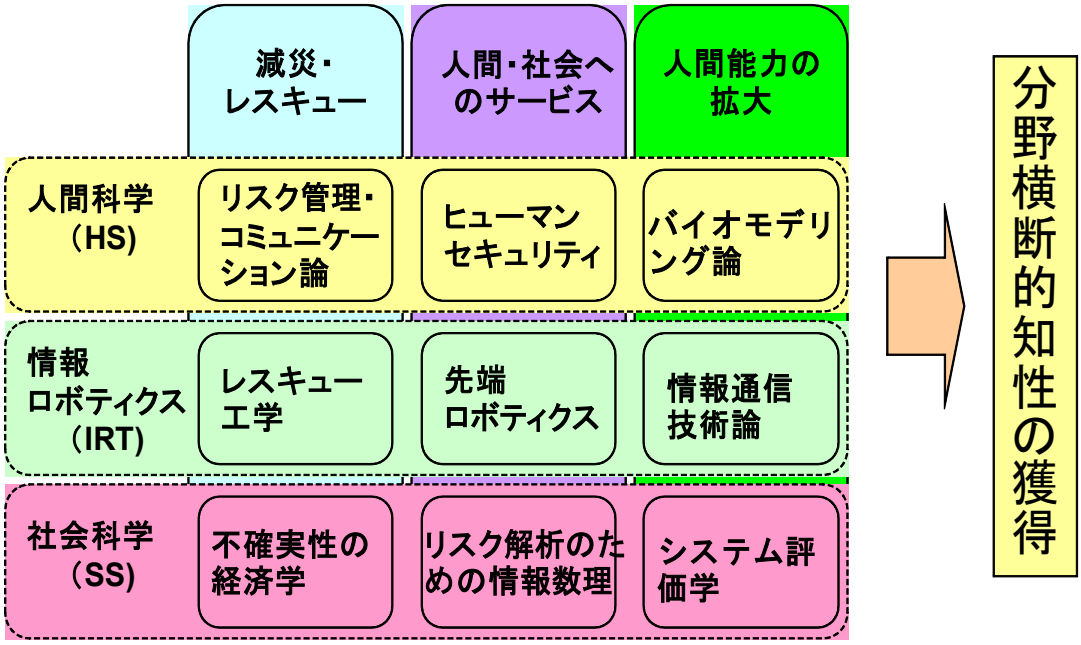

図 3. 10－ 3　　社会基盤ロボティクスのための知の統合のマトリクス構造

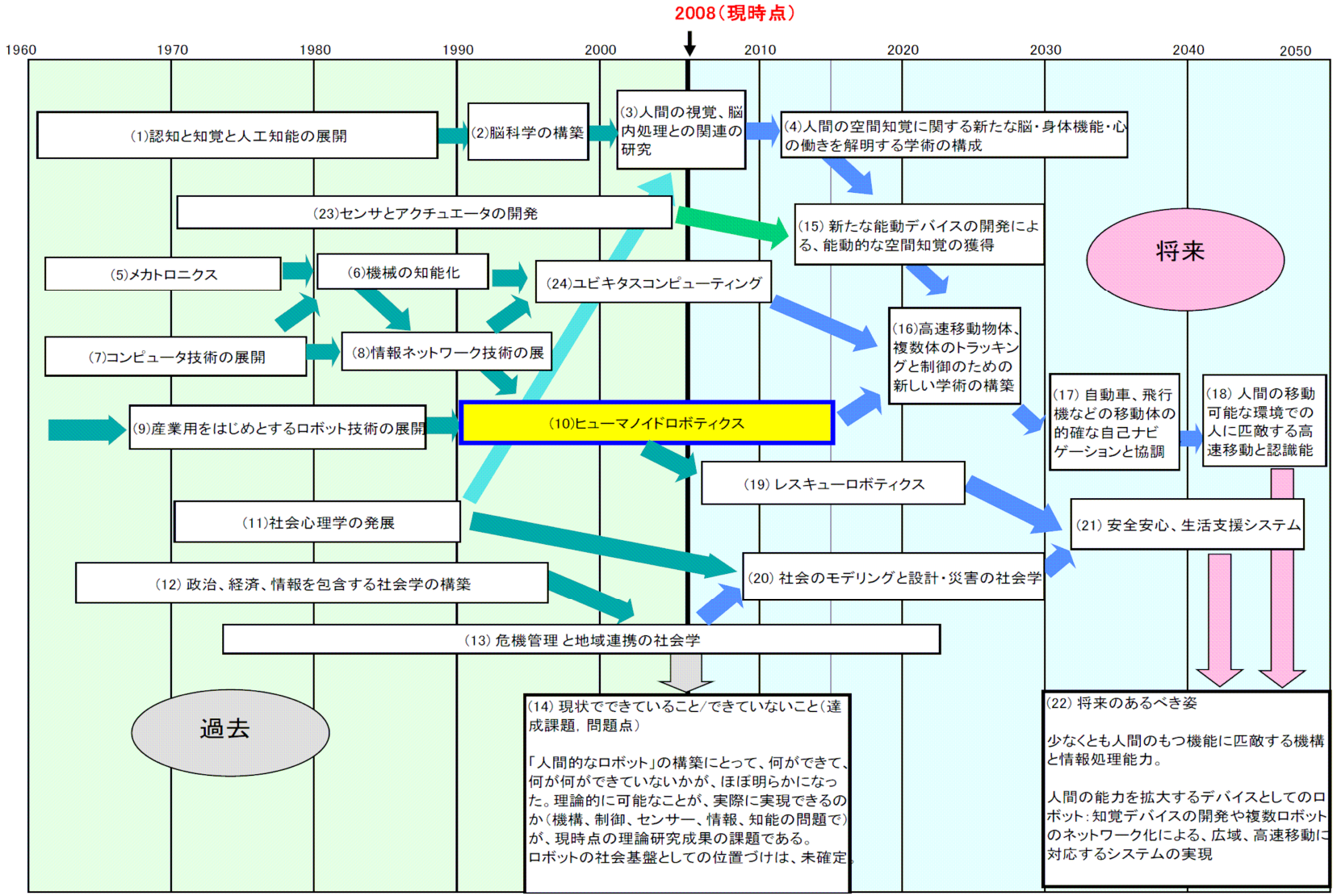

図 3. 10－4　ロボティクス技術を基盤とする高信頼社会構築への知の統合ロードマップ

３．１１　生産システムにおける知のプラットフォーム

３．１１．１　はじめに

20 世紀は生産システムが生まれた時代であった。20 世紀初頭にフォードによる大量生産方式が発明された。これは、職人ごとに作っていた自動車を複数人のラインで作るものである。これにより、均一な品質と効率的な生産、そして低コストを実現できた。同時に、これは職人が個人として持っていた技量をマニュアル化し、ライン内で共有化したものである。

この大量生産方式に続き二つの革命が生産現場で起きた。一つは自動化である。これは、電子化に支えられていた。当初は、真空管やリレー回路を用いた自動化であったが、1973 年のマイコンの発明により、コンピュータを用いた自動化が時代を席巻した。人の判断は 0.1 秒単位、言葉による人のコミュニケーションは 80bps 程度、そして人の記憶能力は曖昧な中で、現在のコンピュータはパワーエレクトロニクスに力も借りながら、μ 秒の応答、Gbps のコミュニケーション、組込み系で MB、ハードディスクが付くと GB の記憶容量を謳歌している。控えめに言って単純作業であれば、間違わない、疲れない、ムラがない自動化機械は既に人を越えている。

さて、大量生産方式に対するもう一つの革命は、トヨタ式と呼ばれるものである。ラインに流し多人数で生産する仕組みは効率的であるが、作業がもっとも遅い人が生産の律速段階となる。何もしなければ作業が早い人の後は在庫となる。また、前段の作業の遅れに配慮すると、後段の人は前段の人の遅れを調節するための在庫を持ちたくなる。つまり、ラインは在庫の山と化し、結果として作業が一番遅い人の速度に生産速度が支配される。この大量生産方式の致命的な欠点の克服がトヨタ式である。在庫をゼロに限りなく近づけることで律速段階を検出し、そこをカイゼンするというものである。この作業をカンバンなどを使って手作業で行ってきた。この基盤となっているものが３S（セイリ、セイトン、シツケ）などと呼ばれる人を中心とするカイゼン活動である。

21 世紀は、この二つの革命の融合から始まっている。つまり、人と自動化機械とが融合した生産である。これには、人を知り、メカを知り、電子回路を知り、情報系を知らなければいけない。この複雑さは人の能力を越えている。一方、ラインで生産される製品も同様の問題を抱えている。乗用自動車を例に挙げれば、トップモデルは 3 万点の部品、100 個に及ぶマイコン、それが相互に接続する Mbps の通信を行う車載 LAN、そして 1 千万行におよぶソフトウェアで支えられている。これも人の理解を越えている。

人の理解を越えている製品を人の理解を越えているラインが作り出していることが日常化しているのが 21 世紀初頭の現在である。この問題の克服には、人への深い理解、機械への深い理解、情報への深い理解がなければならない。つまり、知への深い理解がなければならない。ここでは、そのような観点から生産システムにおける知のプラットフォームを学術の立場から論じる。

３．１１．２　知のプラットフォーム

知とは何か、プラットフォームとは何か。この二つを明確にしなければ、生産システムにおける知のプラットフォームを構築し得ない。まずは、この二つを考えていこう。最初

は知である。知行という言葉があることから分かるように、知は情報系であり、行が駆動系である。知に情報が入力されて、知が駆動系に指示を行う。機械で言えば、コンピュータの役割に相当し、情報系と呼ばれる。情報技術は、情報処理、情報通信、情報蓄積の三つの技術に細分化される。他から知ることが通信技術であり、知っていることが蓄積技術である。そして、それらを総合して知ることが情報処理技術となる。

知の特色は再帰性にある。知が知を生むということである。通信から入ってくる情報と蓄積された情報を元に新たな情報を作り出す処理である。そして、このように集められ、生成され、そして蓄積された知の持つもう一つの特色は予測機能である。知が貴ばれるのは未来が見えるからである。

この二つの特色をカウンターパートである機械で考えると、データの加工とシミュレーションである。データは加工され、新たなデータが作られる。そして、シミュレーションは未来を見せてくれる。データの加工は計算機アルゴリズムと呼ばれているが数式である。そして、コンピュータによるシミュレーションには数学モデルが不可欠である。これも数式と考えることができる。数値データも数式の一番基本的なものと考えると、コンピュータ上で表現される知とは数式ということになる。

次にプラットフォームである。知は生み出された瞬間は独占されている。しばらくして、知の流出が始まる。それは、共有範囲の拡大である。ある程度広がった時点で、集団内での公有の知となる。誰でもが自由に使える知、それが公有知であり、プラットフォーム化された知である。

一人の知は限界がある。仲間内の知も限定的である。公有知となれば難しい問題も解決できる可能性が広がる。このように、知を集め、知を蓄積し、新たな知を生み出し、そして、安全にかつ迅速に知を提供できる環境がプラットフォームである。

つまり、知のプラットフォームを具体的に考えると言葉、経験、メカニズム、ソフトウェアなどを数式化し、公有化することになる。確かに、自然科学で発見されてきた法則は自然現象の数式化であり、それを公有することにより人類は発展してきた。この数式化、公有化に貢献してきものがアカデミアである。この自然科学で成功した手法を人や社会を対象とする社会科学の領域まで拡大することが知のプラットフォーム化の役割であろう。

３．１１．３　生産システム

それでは、生産システムにおける知のプラットフォームを具体的に考えていこう。2008年度の ARM（横断型基幹科学技術研究団体連合, 2008）で生産システムのロードマップを提供した。そこでは、自動車の開発期間が 2030 年には一月、2050 年には三日と予測している。設計と生産の連携である。それには、設計、生産に関わる CAD(Computer Aided Design)の連携が不可欠である(図 3. 11－1 参照)。CAD はデータの変換と数学モデルの操作機能を持つ人への支援ツールである。

実は CAD 連携だけでは足らない。三日で注文主に商品を届けるためには流通との連携が不可欠である。それに留まらず、「もの育て」という 2008 年度 ARM のコンセプトに従うなら設計ツールの注文主への開放を行わなければならない(図 3. 11－2 参照)。専門家の知のツールである CAD を一般人へ解放していく必要がある。もちろん、設計ツールだけではない。生産のツールも、流通のツールも、保守管理のツールも、破棄ツールも開放しなけれ

ばならない。

このように開放されたツール群が生産システムにおけるプラットフォームである。それは、一般人に統一されたものというよりは、場として提供される。ツール自体は提供者が所有し、それを自由に使えるという API(Application Program Interface)の公開である。次に、設計データが共有され、設計図が共有され、数学モデルが共有される。そして、生産ツールが共有され「もの育て」の時代が始まる。これが知の公有である。

このような公有はソフトウェアの世界でいわれる PaaS(Platform as a Service)である。常に新しい知が生まれ、咀嚼され、発展し、寿命を迎える非定常なプラットフォームである。融通無碍だけに、公有した場合の安全性、権利関係、更新性などの問題が山積みである。この問題を学術の立場から考察し解決策を探していくことがアカデミアの世界に求められている。

３．１１．４　未来像

続いて、生産システムにおける「知のプラットフォーム」の未来像を見ていこう。未来を見るには、現在と過去を見なければならない。つまり、現在および過去の知のプラットフォームである。過去の知を集めたものに博物館がある。これは知のプラットフォームの一つである。本項に関わるものとしては生産系の産業博物館を上げたい。手作りから大量生産、そして CAD や CAM を駆使した現在の生産システムまでの一連の流れを学習、研究できる博物館は知のプラットフォームの一つである。

この博物館は実物の展示である。知が情報系ならば、その設計図、特許、手法などの現在、過去を集めたものの方が知のプラットフォームという呼称に近いだろう。それは、図書館である。ここには多数の知が、一つの体系のもとに収納されている。

もっとも、文献が電子ジャーナル化されるとともに図書館は変質している。すなわち、Web 化である。図書館が持つ過去の文献を電子化し図書館のサーバーを用いて公開する。そして、文献を出版する出版社や学会も最新の論文や電子化した過去の論文を出版社などのサーバーを用いて公開する。アクセスする側は検索ソフトを利用して、探している論文に行き着く。

ここでは、一見、図書館の存在が不要という印象を受ける。しかし、図書館の機能は蓄積だけではない。司書は検索に備えた分類機能、検索手法に対する助言機能、検索結果の解釈、そして論文作成の助言機能などを果たしている。つまり、「アーカイブした情報＋単純な検索」だけでは図書館の役割を置換できない。一般的な情報検索の助言、専門的な知に対する助言などの機能を盛り込んだ電子図書館が知のプラットフォームの具体像といえる。

しかしながら、生産システムでは情報系の図書館だけでは機能不足である。情物一体。情報系と現実の部品、製品、そして、それを作り出すツール群の理解が不可欠である。特に高品質のものづくりには人の五感の駆使が不可欠である。五感で最も情報処理量が多いものが視覚である。生産現場では３次元 CAD が人とのインタフェースに用いられている。つまり、人と機械との緊密な関係を作るものが知のプラットフォームだと解釈すると、そこには機械に分かりやすい数学モデルと人に分かりやすい 3 次元表示の高い次元の融合が必要である。それに止まらず、設計されたものが製品となるラッピドプロトタイピングの

技術も必要である。ある意味で、現在使われているノレッジマネージメントシステムをベースにシミュレーションできる数学モデル化、それを 3 次元表示できる 3D 化を図ったものが、ここでの CAD の連携である。

このように考えると前節で考察した CAD ツール群を誰でも、どこでも使える環境が知のプラットフォームである。しかしながら、現在、このようなツール群は高価である。このため、所有できるのは大企業に限定される。これを中小企業にも共有の範囲を広げるには地域単位で設置されている工業試験所などの活用が効果的である。現在、工業試験所は高価な検査装置や加工機を共有している。これに CAD ツール群を加えることで地域単位でも知のプラットフォームを活用できる。さらに、このツール群を公有することで一般人も知のプラットフォームを活用できる。

もっとも、このような高度な知のプラットフォームを使うには人にそれなりの高度な能力を要求する。人はツールを使わなければならず、ツールに使われる人になってはいけない。このためには、もう一つの過去からの知のプラットフォームを活用すべきである。それは教育機関である。初等中等教育では、知のプラットフォームの一般的な使い方を教育するととともに、高等教育においてはツールを使うにあたっての裏づけとなる高度な知識を教育すべきである。そして、アカデミアは、新たなツールを生み出す役割を持つ。同時に、情物一体の考え方と過去を知って現在、未来が分かるという考えに立脚して、各種産業団体や産業博物館では過去の道具を動態保存することが必要である。保存するだけでなく、それを体系化し、生産システムにおける知の発達を新しい世代に伝えていく必要がある。これは、五感で感じる、つまり体感するという意味で数式化や視覚化の限界を越えるために必須である。別な言い方をすれば、現地、現物、現象という日本式の生産システムで重要視される三現主義にそった知のプラットフォーム化である。

３．１１．５　おわりに

以上、知のプラットフォームの統合を考察し、生産システムにおける知のプラットフォームの未来像を論じた。知のプラットフォームは未来に現れるものではなく、過去から存在しているものである。現在では、その役割を図書館、博物館、学校、学会、産業団体、工業試験所、研究所、技術研修所などが生産システムでは行われている。これを高度な情報化に応じて生産システムと直結した形に変えていくことが生産視システムにおける未来の知のプラットフォームである。

同時に、多数の知を活用するためには相互理解が欠かせない。それには、数式を用いた共有、視覚を用いた共有、そして三現主義に基づいた情物一体という観点からの共有が欠かせない。21 世紀に強く認識される知のプラットフォームが、細分化された専門、文と理に分断された学問の融合の切り札となることを祈っている。

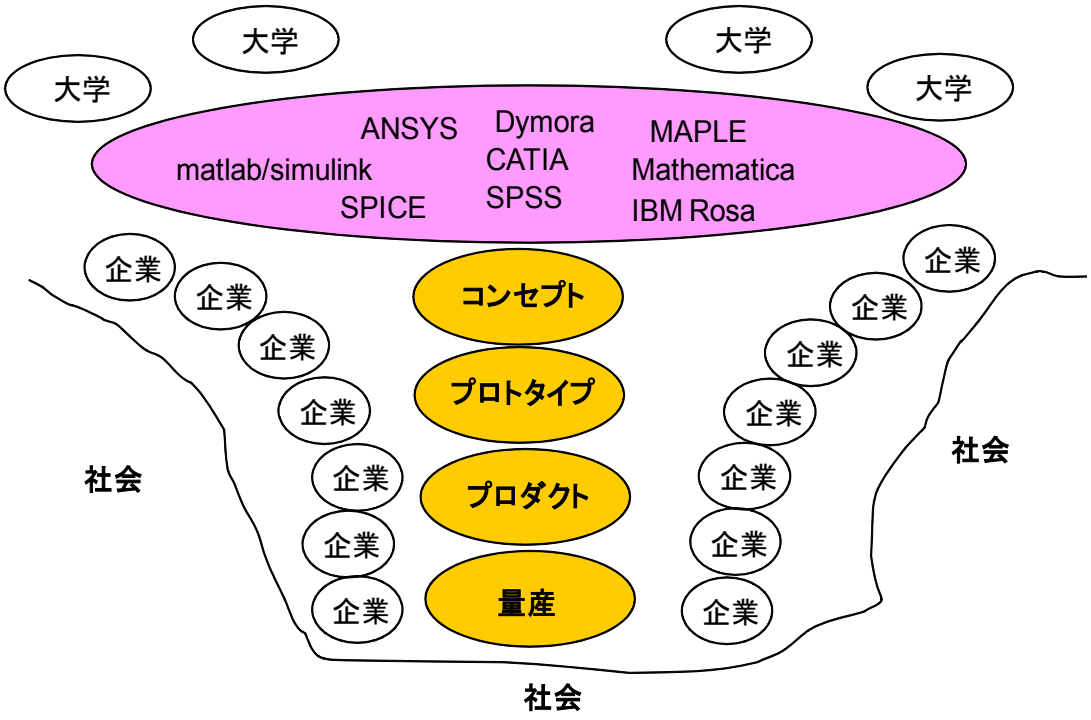

図 3. 11－１　CAE 連携のプラットフォーム

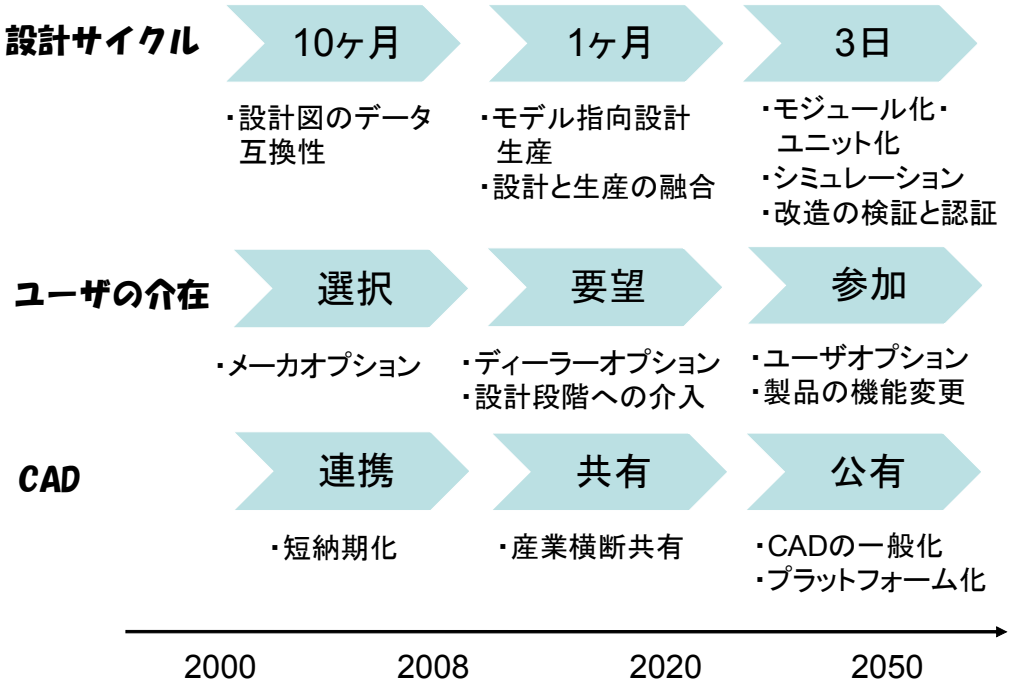

図 3. 11－２　ものづくりからもの育てへのロードマップ

３．１２　計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知の統合

３．１２．１　はじめに

我々人類は自然現象を模倣（シミュレーション）することで多くの知の獲得を行い、それらを統合することで自然を越える新技術や新製品を生産してきた。新技術や新製品の開発は知の獲得とその統合プロセスそのものであるといえよう。ライト兄弟の飛行機の開発を例に出すまでもなく、自然の模倣によって勝ち得た知識を元にした新技術や新製品の開発は、多大な試行錯誤の積み重ねであり、逆に自然現象の模倣による試行錯誤は新技術や新製品開発の重要な手段となっている。

20 世紀後半に弾道計算の高速化を目的に作られた電子計算機は、その中に様々な環境の構築が可能であり、安全で高速にかつ安価にさまざまな試行を実行することが可能であるため、大規模建造物（橋、ビル、宇宙ロケット、大型ジェット飛行機、原子炉など）の設計や気象解析など、様々な分野におけるシミュレーションを可能とし、その経済性と安全性が広く認められてきた。例えば自動車や船舶ならびに飛行機などの開発に、かつては大規模な風洞実験が欠かせなかったが、いまやそのかなりの部分が計算機シミュレーションにとって替わろうとしている。21 世紀初頭の現在、電子計算機性能の驚異的な飛躍とインターネットをはじめとする種々のネットワーク技術の普及を背景として、さまざまな分野において、これまで以上に計算機シミュレーションへの期待が高まっている。

計算機シミュレーションは、距離で原子・分子の世界のオングストローム（10^{-10}m）から宇宙空間の光年（10^{155}m）、時間にして 1 フェムト秒（10^{-15}sec.）から 1020 年の広大な時空における現象、また太陽の中心における高温・高圧の環境から、絶対 0 度・圧力 0 の極限の環境における現象を、我々の生きる時空（1m,1sec.）ならびに絶対温度 300 度・1 気圧の世界で見せてくれる。本稿で中心的に述べる材料開発および創薬の分野は、原子・分子の世界を対象とする。そのため、電子顕微鏡などの精密測定装置や計算機の発展により、計算機シミュレーションの結果が実験の解釈を基礎づける有力な証拠として位置づけられている。1980 年代後半に、計算機シミュレーションを武器とする計算科学が、自然科学現象の研究手段として実験と理論とをあわせた鼎の一つとして位置づけられたのは、その経済性、安全性、迅速性、結果解析の容易性とその再現性にある。さらに 21 世紀初頭では、複雑系科学のように計算機シミュレーション手法なしには成立し得ない分野の発展を促している。

材料開発および創薬分野の計算機シミュレーションの最終目標は、材料開発では、材料の加工、利用そして廃棄までのプロセスを考慮した物質材料設計であり、創薬では、対象症状を改善する分子の発見・合成およびそれに繋がる製品化ばかりでなく、その人体に対する副作用や毒性および代謝による体外への排出プロセスまでをモデル内に含むシミュレーションに基づく創薬である。遺伝子医療と創薬との強い関係の構築もシミュレーションに基づく知の統合の大きなターゲットである。そのためには、循環型社会形成を目指した要素技術開発、並びに広範囲な知の統合が必要となる。

３．１２．２　計算機シミュレーションの基盤技術としての計算機性能の発展動向

まず計算機シミュレーションの基盤となる計算機性能の発展動向を見てみる。

TOP500(1993 年より各年の全世界のスーパーコンピュータシステム性能ランキング 500 位 http://www.top500.org/)にみられる計算機性能の発展動向によれば、500 システムの性能の総和、各年の第一位の性能および 500 システムの平均性能という 3 種のトレンドは、ほぼ同じ傾向を持ち、10 年で 100 倍の割合で向上してきたことを示している。この傾向は 2020 年ぐらいまでは維持されるであろうと言われている。なぜなら、この性能向上の傾向は CPU の性能向上に関するムーアの法則だけではなく、台数効果、すなわち並列処理によってもたらされているからである。本稿はこの傾向が 2040 年ぐらいまで続くことを念頭に置いている。

３．１２．３　材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の構造

材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の構造は、図 3. 12－1 に示すように三角形になっている。三角形の上側に行くほど抽象化・一般化の度合いが高く、下側はそれが低いことを示している。

そのため知の統合とは、下層の要素データの集合から、抽象化の度合いの高い情報を抽出するプロセスであり、その契機は、上層の抽象度の高い情報にない要素データの発見である。知の統合の例として量子力学の成立プロセスがあげられる。具体的には黒体輻射現象の観測データの収集が古典論では説明できないことが認識されることにより、プランク定数の発見など前期量子力学が形成され、さらに原子分子のスペクトル観測データの収集と解析が定常状態量子力学の完成を促した。さらに半導体の発見に基づくトランジスタ開発などエレクトロニクスの実験や生産を通じて、量子電磁気学の完成を見るにいたった。さらに観測精度が向上することで相対論と量子論の統合が行われて、現在に至っている。

この三角形の左側の下に向かう矢印は、科学技術における演繹的プロセスであり、始点は量子力学の HΨ=EΨ (シュレディンガー方程式) である。その終点は箇々の物性値となる。逆に左側の上向きの線は帰納的なプロセスを表している。各レベルの面積の大きさは各レベルの知識要素を計算機に格納するのに必要なディスクのサイズを象徴している。この三角形は大まかに三層に分けて考えることが可能であるが、もちろんその境界線は明確なものではない。まず一番下のレイヤー1 は、要素データレベルであり、箇々の数値データそのものをしめしている。そのため、数値そのものや文献情報などを格納するための莫大な量の記憶域が必要である。その上のレイヤー2 は、情報統合レベルであり、箇々にはデータの統合から得られる経験や様々なノウハウなどが格納され、レイヤー1 の数値が有機的に体系づけられたデータベース群やプログラム群がある。その上位には、データベースからデータマイニング処理を経て知識を抽出した、物性推算式構築作業などがある。一番上のレイヤー3 は知識統合レベルであり、短い文章表現や数学的記述が主なものである。特に三角形の頂点に位置する原理、例えば量子力学の基礎方程式 HΨ=EΨ は、20 バイト程度である。

現象の測定や計算機シミュレーションによって得られる生データ（レイヤー1）のデータ間の関連性を数学や情報科学的手法を用いて解析することによってその現象に関する情報や物性推算式（レイヤー2）が得られる。それらの情報をさらに一般化・統合化することによって、究極的には f=mα（ニュートン方程式）や HΨ=EΨ（シュレディンガー方程式）といった原理（レイヤー3）を得ることがでる。よく知られている事だが、f=mα や HΨ=EΨ といった原理はもっと他の式からは求められない。膨大なデータの統合から情報を引き出し、

それを数文字に纏めてしまった天才達の偉大さを今更ながら思う。この絵の上から下、下から上を行き来することが知識獲得つまり学問の営みである。ここでは上から下、下から上の過程を直線で書いたが、実際は至る所で渦巻いていて、乱流のようになっている。

このような構造を持つ計算機ミュレーションによる材料開発・創薬のための知は、その統合により現在の家電や市販薬等に見られるように、人類の生活を豊かにするさまざまな補助ツールを直接生み出すことが可能である。そして知の統合プロセスが直接イノベーションの創出、すなわち新たな価値、サービス、さらには新産業を創出する。

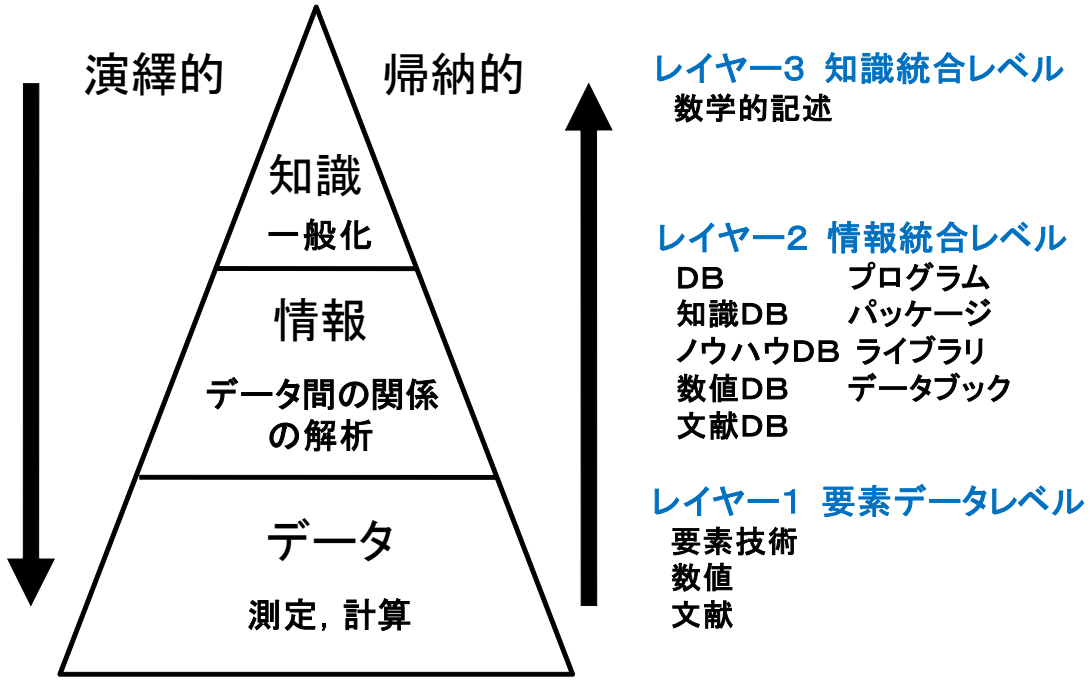

図 3. 12－１　材料設計における知識の構造

３．１２．４　材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の統合アカデミック・ロードマップ

不十分であるが、材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の統合アカデミック・ロードマップを図 3.12－2 に示す。レイヤー3 は主に数式そのものや文章そのものであるので、ロードマップには示さなかった。縦に技法、横に時間を取っている。

レイヤー1 では要素データ生成取得に関するシーズであるシミュレーション技法ごとに年代に沿ってゴールであるところのシミュレーション対象が並べてある。黒で示したものが対象となる系の物性であり静的情報を意味している。青は、合成プロセス等のダイナミクスである。ここでは主に材料開発・創薬が中心であるので、反応動力学が主体である。反応動力学シミュレーションは静的な電子状態シミュレーションより、時間軸上の積分が入るため難しいが、計算機性能の順調な向上を背景に大体 5 年遅れ程度となっている。技法の精度は上側が高く、計算量が多くなるため、ゴールとなる対象物のサイズは下に行くほど大きくなる。

近似 Hartree-Fock(HF) [注1]計算の 2025 年あたりの生体膜および有機無機複合機能性材料の開発は、計算機シミュレーションに多大な期待が寄せられているが、本稿を執筆している 2009 年初頭では要素技術としての計算理論の構築（レイヤー1）とプログラム作成（レイヤー2）が精力的に行われており、実際の系のシミュレーションと実験（レイヤー3 下部）には、順調な計算機性能の改善を仮定しても 5 年から 10 年後となることが予想できる。

レイヤー2 では、レイヤー1 で生成された要素データの有機的つながりを示す DB 開発の可能性を示している。黒は DB 作成であり、青は DB 相互の関連づけと情報の自動抽出プロセスが示してある。最終ゴールは統合された知識 DB の自動生成とそこからのより抽象度の高い知識生成と統合（DB）の自動化である。

よく知られているように、すでに古くから文献 DB や数値 DB など多くの作成プロジェクトが続けられている。この図の上側は抽象度が高く、下に行くにつれ抽象度が低い。文献 DB と数値 DB の抽象度の違いは、出版された文献データの採取というプロセスが抽象化のステップと見なされるためである。2009 年ではそれらの相互リンクがもうすぐ開始されようとしているが、現在はまだ大きな動きはない。レイヤー2 とレイヤー3 の境界はレイヤー1 とレイヤー2 のそれの比べて曖昧である。

計算物性に関してはシミュレーションプログラムパッケージにより結果の自動 DB 化ならびに物性推算式の自動構築が進められており、数値 DB である計算物性 DB の自動作成の試みが始まっている。計算物性 DB は 2020 年までには普及することが期待される。反応 DB や遷移状態 DB など、材料開発・創薬分野のノウハウの DB 化もすでに始まっており、それらのノウハウ DB が物質合成に欠かせなくなる時期も近い。ただ、ある種のエキスパートシステムを除いて、知識 DB の試みは遅々として進んでいない。DB 作成は継続的なものであり、時間軸に沿って発展していくものである。この考え方は欧米で広く理解されているが、日本では短期的な DB 作成ばかりが行われ、継続性には考慮が払われていない。そのため、日本製の DB は陳腐化が早い。

また、このレイヤーの最上位に位置するプログラムシステム開発は、単発的なものは期待できるが、Gaussian [注2]や GAMESS [注3]、CPMD [注4]などのように分野標準となる統合化システムは国内では見られない。日本の科学技術政策の変更無しには今後も出てこないであろう。もちろん、文献データベースの CAS や数値データベースの PDB のような DB 作成

注1 Hartree-Fock(HF)計算は、最も基本的な分子の電子状態シミュレーション法である。

注2 Gaussian は、非経験的分子軌道計算のパッケージプログラムである。量子論的に分子のエネルギー、分子構造、分子系の振動数を予測する。また、これらの基本的な計算の種類から導かれる様々な分子特性も予測できる。Official site: http://www.gaussian.com/を参照。

注3 GAMESS は、非経験的分子軌道計算のパッケージプログラムである。フリーソフトでありアメリカＮＳＦは本プログラムの開発を継続的に支援している。量子論的に分子のエネルギー、分子構造、分子系の振動数を予測し、また、これらの基本的な計算の種類から導かれる様々な分子特性も予測で可能。Official site: http://www.msg.ameslab.gov/GAMESS/を参照。

注4 CPMD（Carr-Parrinello Molecular Dynamics program package）は擬ポテンシャルファイルと平面波基底を用いた密度汎関数法のパッケージプログラムである。Official site: http://www.cpmd.org/を参照。

プロジェクトも望むべくもない。多くの原因は、日本の継続的なプロジェクトを容認する科学技術政策の欠乏にある。

レイヤー3 に関しては、いくつかエキスパートシステムの構築がなされているが、知の統合に関するアカデミック・ロードマップに掲載する論点は見あたらない。これは、すでに量子力学が完成していることに起因している。ただ、計算手法の開発と統合に関して、日本は新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界のトップレベルにある。しかし、多くの知の統合の成果であるシミュレータなどソフトウェアの作成・維持管理に関しては欧米に比較して圧倒的に遅れており、知の普及に関する支援体制構築の遅れとなっている。

３．１２．５　材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の統合プラットフォーム

材料開発・創薬の計算機シミュレーションにおける知の統合プラットフォームの概念図を図 3. 12−3 に示した。この統合プラットフォームを支える基盤技術は大規模高速計算機システムである。レイヤー1 の知識統合レベルにある理論や原理を基盤とするレイヤー2 にあるシミュレータ群に対し、要求物性の（計算）要求が入力される。それぞれに対し問題サイズや精度に対応する要素技術または文献 DB や数値 DB による情報の統合化を経て材料開発・創薬のターゲットの設計指針および合成指針が得られる。この際、反応 DB 等を用いて実際の製品である物質の合成が行われる。この各プロセスで得られた知識はそれぞれのレイヤーにフィードバックされる。このプロセスにより、要求物性を持つ物質が発見できない場合は、要求物性の絞込みや逆に多角化により要求物性を持つ物質の候補が見つかるまで、このプロセスは繰り返される。

知の統合プラットフォームの役割の多くの部分は、要求物性のフィードフォワードとそれに随伴するさまざまな知のフィードバックというサイクルを安定に加速し、そのサイクルタイムを短縮することにより、開発者の実質的な寿命を延ばすことにある。またひとりの開発者では到底取得不能な、広範囲な異分野の知の共有化と統合化を可能とすることもプラットフォームの大きな役割である。

３．１２．６　おわりに　ー知の統合をいっそう推進するためにー

先にも述べたが、計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知は、その統合により現在の家電や市販薬等に見られるように、人類の生活を豊かにするさまざまな補助ツールを直接生み出す。そして知の統合プロセスが直接イノベーションの創出、すなわち新たな価値、サービス、さらには新産業を創出する。

材料開発・創薬分野において知の統合を推進していくには、(一般的にも同様であるが)将来を見通した知の統合が実践できる優秀な人材と継続的な活動を保証する安定したポストが必要である。これは、材料開発・創薬分野における研究には古典物理、相対論、量子論の知識が必要であり、シミュレーション実行には計算科学の知識も必要であるからである。さらに DB 作成やプログラム開発等、知の統合に関する継続的で潤沢な資金が必要である。これにより知の統合による成果の維持管理体制の確立が可能となる。特に知の統合に関して急いで行うべきこととして、シーズからプロダクトへの一貫した流れの生成・育成があげられる。これは、データから知識（コンテクスト、インフォメーション)、そして

法則・知（インテリジェンス）への統合・集中への作業の一貫した流れ、および専門家から一般人への知識、法則・知の教育伝達の流れ（知の普及とレベルアップ）にほかならない。

知の統合を基にした研究推進の方法や戦略は、科学（ハイリスク研究）と技術の分離（棲み分け）による 10 年スパンの研究計画と研究者育成があげられる。これには国家的な異分野融合プロジェクト、ハイリスク研究の奨励が必要であり、これは萌芽⇒生育（製品開発）⇒開花（起業化）といったプロセスの分業体制の確立と維持を生み出すものである。

知の統合プラットフォームを構築するためのメカニズムや方法論としては、まず健全なで思いつきではない良く練られた長期的な人材育成と、知の基盤となる基礎科学（とくにハイリスク研究への投資が必要である。

計算機シミュレーション分野における特徴的なことは「学際計算科学」の必要性である。計算科学は、21 世紀の科学技術を牽引する最先端・最重要分野の一つであり、自然・人間・環境のグランドチャレンジを解決する鍵としての科学の一分野である。グランドチャレンジの解決を実現するには、従来の科学と計算機科学・情報科学のより緊密な融合、つまり知の統合を実現する必要がある。これを成功させる鍵は、計算科学を連携軸とする、科学全般に対する俯瞰的視野を持つ人材の育成にある。これまでの「計算科学」は、個々の分野の一部としての「計算科学」であり、個々の分野の短期的なプロジェクトとして推進されてきた。具体的には個々の分野の研究者による「大計センター」等の計算機施設利用がおもな研究遂行の姿勢であった。これを継続することは、本分野だけを見ても古典論、相対論、量子論に加え、計算機科学の知識の獲得が必要であるので、到底不可能である。これを克服するためには、学際計算科学の確立が必要である。

学際計算科学では、計算科学諸分野と計算機科学の融合・連携をおこなう。研究者が目的としているグランドチャレンジを解決するシミュレーションのための計算機システムは、急速に大規模化、多様化し、これを使いこなすためには高性能計算技術が不可欠である。さらに、次世代、次々世代の計算科学を可能にする持続的な計算技術・計算機システム・計算科学応用の研究開発が必須となる。つまり、個々の分野のグランドチャレンジをシミュレーションで解決しようとするには、計算科学の分野を包括的に捉える横糸としての計算科学が必要であるということである。特に大規模数値解析を共通軸とする計算科学の方法は、科学諸分野を分野横断的に捉えることが可能であるため、次世代スパコンを十分に活用し、計算科学により未踏領域を開拓するためには、新しい学術領域として学際的な「計算科学」を確立し、継続的に発展させることが重要であろう。

これからのハイエンドコンピューティングにおいてはシステム側とアプリケーション側の研究者の共同作業が必要であり、両者が協力してシミュレーションの並列化、ベクトル化、アルゴリズム等の開発を行う必要がある。それ以上に、異なる分野のアプリケーション同士の知識やノウハウの共有が必要になってくる。これらの共同作業を実現する場としての枠組みを提供するためにも学際計算科学分野の確立が知の統合を経てなされることが必要である。

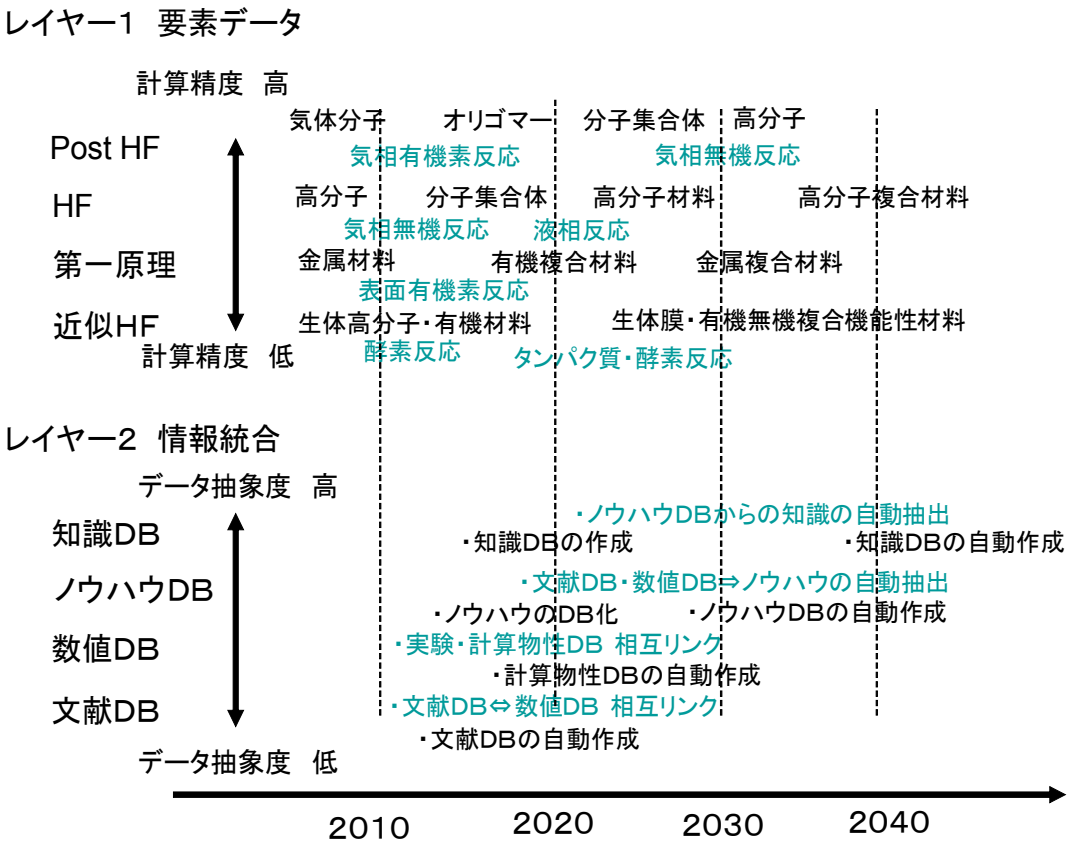

図 3. 12－２　材料設計における知の統合アカデミック・ロードマップ

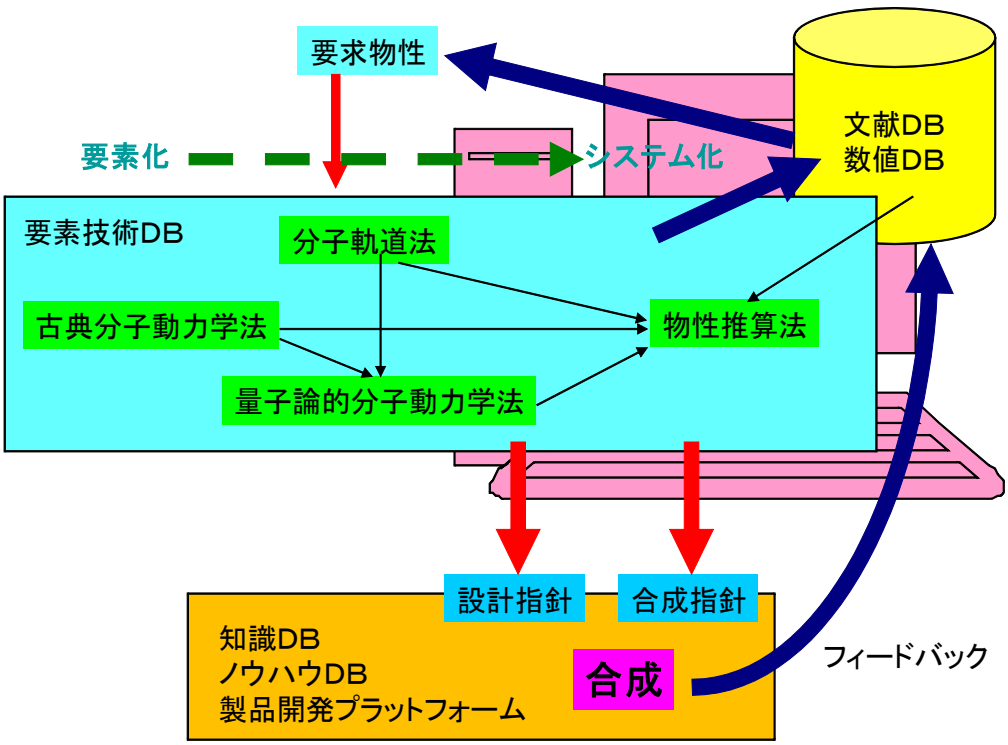

図 3. 12－３　材料設計における知の統合プラットフォーム

３．１３　知の統合プラットフォームの機能と役割

３．１３．１　知の統合プラットフォームのまとめ

これまで、知の統合により創出される学術分野や技術分野の具体的な事例を通して、知の統合プラットフォーム構築に向けたアカデミック・ロードマップについて述べてきた。本節では、まずこれらの具体的な事例を通して、知の統合プラットフォームの仕組みや役割についてまとめる。

3.3節「文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて」では、理工系と人文社会系との連携の必要性と相互理解に向けたプラットフォームを示した。個別分野からの問題抽出、個別分野から提起された諸問題を統合するモデリング・ツール、個別分野間相互のコミュニケーションの場の構成、からなる専門家の学術分野の統合プラットフォームの必要性とともに、これだけではなく、専門家ではない生活者との情報共有と相互対話を可能にするプラットフォームの構築の必要性についても述べている。知の統合プラットフォームは、個別学術分野の統合の場であると同時に、専門家と非専門家、生活者、社会との相互対話を実践できる場でなければならないことが強調されている。

3.4節「リスクガバナンスのための総合情報基盤構築」では、リスク研究の対象が広範囲にわたっており、個々のリスク対象やリスク現象に依存しない共通性や異なる分野の概念融合が有用であることを述べ、そのための知の構造を、リスク解析、リスク管理、リスクコミュニケーション、リスクガバナンスの４つのレイヤーで表現をし、それぞれ関連する学術分野の統合化の必要性とその目的を示した。この概念の共有化と相互認識によって最上位のレイヤーのリスクガバナンスが社会的に受容された形で達成することが可能となる。リスクガバナンスのための総合情報基盤の構築に向けた学術的なプロセスを明らかにしている。

3.5節「情報循環設計科学をプラットフォームとした定量的リスク科学の創生」では、「実社会からの価値選択」から「要求価値の工学モデルへの変換」、「モデル上での最適化」を経て「最適化された価値の実社会への注入」といった一般設計科学生成サイクルを基盤とするプラットフォームを述べている。対応するディシプリンとして、それぞれ「社会から価値を発見的ないしは意図的に選択する方法論を扱う科学」、「価値を創生するシステムを同定する科学」、「システム上で価値生成のパフォーマンスを最適に設計する工学」、「創生した価値を社会に実装し納得をしてもらうための工学」の４つの横断的情報科学、情報工学の各分野の有機的な連携により構築される。価値観を前提とする人間・社会の学術全般を反証不能な規範的科学から知のスパイラルアップが可能な設計科学に昇華させるための不可欠なプラットフォームである。このプラットフォームを基盤として、他の学術分野との統合化により、定量的リスク科学、経営設計科学、社会設計科学などが創出される普遍性の高い役割と可能性をもつことを述べている。

3.6節「持続可能未来社会デザインのための知の統合」では、統計科学・数理科学と関連する学術分野の統合による大規模システム推測プラットフォームの構築と諸課題の解決について述べた。20 世紀社会における不特定多数への大量生産・大量消費を目指した成長志向の社会から環境を考慮した持続可能な社会への移行とともに、一方では個に焦点を当てた科学の必要性が生まれ、これらの課題解決を目的とした大規模システム推測プラットフ

ォームが示されている。

3. 7 節「低炭素社会の構築」では、2050 年温室効果ガス排出量半減という目標に向けた知の統合プラットフォームの目的と役割を述べた。排出量の抑制とその影響の低減の対策のための環境技術や環境政策、対応策実施のための観測・プロセス解明・予測のための環境科学・技術、人間のあり方や社会や経済と科学技術のあり方、社会のあり方の方向付け、世界の国々との連携のための国際関係など、人文科学や社会技術を含む知と知識の統合化が必要である。これらの統合化された学術分野を基盤として、各国や地域に対する共通で普遍的な評価が可能なシステムや方法論を与えている点が、このプラットフォームの大きな特徴であり目的となっている。例えば、監視・予測システム、技術評価システム、社会評価システムなどを整備することにより、GHG 認証など具体的な課題に対して共通の視点から評価を実施することが可能となる。

3. 8 節「電子民主主義による社会の構築」では、社会問題における多種多様な利害関係やコンフリクトの中での納得の原理に基づいた電子民主主義社会の構築に向けたプラットフォームの構築について述べた。理工学分野と人文社会科学分野とを横断的に統合した複合領域を基盤として、情報通信システム技術の高度化に伴う成果を十分に活かしたアプローチにより、電子的参加の制度設計に向けた合意形成プラットフォームおよび電子民主主義の制度設計に向けた政策形成プラットフォームの構築について述べている。プラットフォーム上では、さまざまな異分野との連携方法論、集団意思決定支援技術、情報・知識コモンズの整備、集団的問題解決能力の強化など統合化技術が機能する。

3. 9 節「ヒューマン・マシン協働によるディペンダブルな安全・安心の社会の構築」では、ヒューマン・マシン（HM）協働の体系化を基盤とした安全・安心の社会構築に向けた統合プラットフォームについて述べた。この上で、人を考慮した安全設計の実現に向けた認知工学、認知心理学、行動学と信頼性工学との融合、長期経年劣化の安全性の確立に向けた情報の共有化やコミュニケーション、多様な環境変動に対応した信頼性設計のための予測・発見科学、社会傾向予測、データマイニング、オンラインデータベースなどとの連携、さらに個人適合型信頼性確保のためのデータマイニングなどのデータ収集と学習機能、適用状況のセンシングなどとの協調などが実現されている。

3. 10 節「ロボティクス基盤高信頼社会の構築」では、ロボティクスを基盤とした安心安全な高信頼社会のデザインに向けて、情報ロボティクス、社会科学、人間科学の 3 分野を枠組みとする知の統合について述べた。さらに、ロボットを活用した減災・レスキューなどによる安全社会の確立、ロボットが少子高齢化社会における人間・社会へのサービスを実現する安心の創生、ロボットが人間の能力を補完して社会的役目の一部を担う人間能力の拡大の 3 つを活用場面とした 3×3 の有機的なマトリックス構造からなるプラットフォームを提示している。このプラットフォームのもとで、高度なロボット開発とその社会での活用の方向性を示すとともに、ロボティクスと協働した未来社会の制度設計を先取りできる予見社会科学と、人間・社会へのサービスや人間能力の拡大が社会構造に変革をもたらす意味を追求する人間・社会科学を学術として確立することが目的となっている。

3. 11 節「生産システムにおける知の統合」では、生産システムにおける知のプラットフォームの役割とその構築について述べた。プラットフォーム上では、設計・生産に関わる CAD の連携が不可欠であり、データの変換と数学モデルの操作を支援する。設計・生産ツ

ールだけでなく、流通、保守管理、破棄のツールも開放しなければならない。これらが生産システムの知のプラットフォームを構築するが、これが場として提供され、自由に誰でも使える API として公開されることが重要である。設計データ、設計図、数学モデルが共有され、生産ツールが共有されるという意味での知の公有が行われる。プラットフォームの役割はこれらのツール群の公有にあるといってよい。知は再帰的であり、蓄積により将来を予測でき、また常に新しい知により発展する非定常性という特徴をもつ。このような基盤は、個別産業にはそれほど依存しない共通なプラットフォームである。

3. 12 節「計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知の統合」では、基盤技術を大規模高速計算機システムとするプラットフォームについて述べた。レイヤー1 の知識統合レベルにある理論や原理を基盤とするレイヤー2 のシミュレータ群に対し、要求物性が入力され、対応する文献 DB や数値 DB による情報の統合化を経て、材料開発・創薬の設計指針や合成指針が得られるが、これらの共通的な作業を実施する場がプラットフォームとなる。要求物性のフィードフォワードとそれに付随するさまざまな結果や知のフィードバックというサイクルを安定に加速し、そのサイクルタイムを短縮すること、さらに一人の開発者では不可能な広範囲な異分野の知、物理学、材料科学、計算機科学、データベースなどの統合化と共有化を可能にすること、などがプラットフォームの役割である。

以上、本章で説明された知の統合が必要である 10 の目標に向けてのアカデミック・ロードマップとそれを支援する知の統合プラットフォームについて、それぞれの特徴や役割についてまとめた。さらに、表 3. 13−1 は、個々の目標に向けた統合プラットフォームの実体やそこで統合される学術分野、統合が必要とされる背景やプラットフォームがもつ普遍性、知の統合を推進するための施策や評価などの視点からまとめたものである。今回のアカデミック・ロードマップの方向が理工系と人文社会科学系との連携に焦点をあてたこともあり、プラットフォームの必要性がいずれも強く指摘されている。

３．１３．２　知の統合を支援するプラットフォーム

前節で述べたように、知の統合プラットフォームが果たすべき役割や機能はつぎのように要約できる。

（1）　知の統合により一段高い普遍性をもった新しい学術を創出する役割

3. 6 節で述べたように、情報循環設計科学をプラットフォームとして構築することにより、環境科学との融合により定量的環境リスク科学、金融工学との融合により定量的金融リスク科学、などを創出し、さらにこれらを統合化することにより、さまざまなリスク対象やリスク現象を取り扱う一般定量的リスク科学を創出するという新たな知を生み出す普遍性をもつプロセスとして機能する。さらに、情報循環設計科学をプラットフォームは、経営学や社会学と融合することにより、それぞれ経営設計科学や社会設計科学を生み出す基盤となる可能性をもつ。このようにプラットフォームを基盤として新たな学術が創生される場となる。

（2）プラットフォームがもつ共通性により、さまざまな課題への解を与える役割

本章で提示された多くの知の統合プラットフォームは、そのターゲットが社会や人間を包含するシステムを対象としてことから、理工系だけでなく人文社会系との連携が不可欠であり、この連携を基盤としている。学術の細分化は、理工系だけでなく人文社会系でも

同様である。プラットフォーム上では、各学術領域の細分化の壁を超えたコミュニケーションのもとでのプラットフォームの形成が必要となる。課題や目標が与えられたとき、共通の枠組みと対応策をソリューションとして提供する特殊化が大きな役割となる。

（3）場の共有、知の公有を活用する基盤としての役割

3. 3 節、3. 4 節、3. 8 節など本章の多くの節において、目標とする社会の構築に向けた統合プラットフォームは、専門家と非専門家とが情報共有と相互対話を可能にする機能をもつ必要があることが述べられている。さらに、3. 11 節の CAE 連携では、さまざまな設計などツール群を誰でも利用できるオープンな機能が要求されるであろう。これまでの大量生産、多数決原理、全体中心主義などから、個を尊重する時代へのシフトに向けて、個人の趣向に応じた生産（プロシューマへの対応)、コンフリクトの存在下での合意形成、人間個人の存在の重視、を考慮しつつ、社会や人間に焦点を当てた学術・技術の今後の展開にとって、このようなプラットフォームの機能はますます重要性を高めるものと思われる。

（4） 統合プラットフォーム上でのスパイラルアップ機能

本章の多くの節で述べられているように、プラットフォーム上では、共通と思われる機能として、社会の現象を観測し、それに基づいてモデル化を行い、目標を達成するための対応策を策定し、それを社会へ実装化する、という 4 つの機能からなるプロセスがある。理工学の細分化された各分野では、このサイクル、すなわち、観測、モデル化、制御、評価という閉じたプロセスは通常のアプローチとして用いられてきているが、人間や社会を含む大規模なシステムに関しては、サイクルのそれぞれが独立した学術分野であり、これらを統合化することにより初めてループを閉じることができ、新たな学術領域や課題解決のための手法を与えることができると同時に、サイクルを構成する統合化された学術のスパイラルアップが可能となり、知のプラットフォームとしてさらなる機能向上が達成できる。

表3．13－1　知の統合プラットフォームの概要

ターゲット・目標	知の統合プラットフォーム	統合を支援する学術・技術分野	統合が必要な背景・普遍性	知の統合のための施策・評価
1．文理の枠を超えた相互理解型社会に向けて （第3．3節）	分野横断的モデリングや問題定式化の方法論，情報共有と相互コミュニケーションの場，公開と共有などを実践可能なプラットフォームの構築	シミュレーション，統計学，数学などのモデリング方法論，社会情報学，アーカイブス学などのコミュニケーションの場の構築の方法論，など	現代の地球社会が直面している環境，食糧，疫病，テロリズム，世界経済，情報，などの諸問題の解決には，文理横断，文理の壁を超えた相互理解の推進が必要。	文理融合を推進するための教育組織や教育方法の改革，文理対話の場としてのアカデミーの役割，次世代のための文理横断的教育の実施，文理を架橋する研究者の積極的な学会活動。
2．リスクガバナンスのための総合情報基盤構築 （第3．4節）	リスク研究のための総合情報基盤を構築する。リスク解析，リスク管理，リスクコミュニケーション，リスクガバナンスの各レベル構造をもつ統合プラットフォームの構築。	法学・社会学，心理学・情報学，経営科学・工学応用，数理・統計科学・工学基礎，哲学，倫理学，教育学	専門家，非専門家，異分野間コミュニケーションの必要性，リスクガバナンスの社会的要請など。	若手研究者育成のための中長期的文理融合プロジェクト．教育制度改革
3．情報循環設計科学をプラットフォームとした定量的リスク科学の創生 （第3．5節）	発見科学，統計科学，最適化工学，コミュニケーション工学，データベース構築により，情報循環設計科学のプラットフォームが構築される。	発見科学，統計科学，最適化工学，コミュニケーション工学，および個別分野（物質科学，生物科学，社会科学など）	個別分野における定量的リスク科学の構築のために，統合プラットフォーム上で例えば，定量的環境リスク科学や定量的金融リスク科学などの新しい学術の創出が必要。	情報循環設計科学の基盤構築と個別リスク対象のデータベースの構築と統合したデータアーカイブの整備と、若手研究者育成と学部・大学院における横断型教育の実施。
4．持続可能未来社会デザインのための知の統合 （第3．6節）	自然科学，社会科学，人文科学をベースとし，統計学を基盤とした大規模システム推測プラットフォームの構築。	地球科学，環境科学 資源工学・エネルギー工学 生物学・情報生物学 経済学	統計学的視点から大規模かつ複雑なシステムにおける普遍性の高い統計的推測技術の確立により，地現象・災害予測，生命システム分析，社会現象予測・政策提言を行う。	シーズ内，文理間など学問領域間のコミュニケーション，産学間・官学間のコミュニケーション，人材育成，統計教育やソフトウエア開発。
5．低炭素社会の構築（第3．7節）	低炭素社会の実現を目指した具体的な地域や国が、その対象地域でどのような技術や施策の選択を行い、実施後の評価をするか、など一連の手順に必要な知見を与えるためのプラットフォームの構築。	人文社会学（哲学，倫理，社会学，経済学、法学など）、自然科学（生物学、地球科学、気候学など）、工学（エネルギー工学、計測工学、制御工学、システム工学など）、環境技術、社会技術	左に挙げた多様な学術分野における知や知識を、俯瞰的、横断的に見渡すと同時に、低炭素社会実現という解決点に向けて最適に組み合わるために統合化が必要。	様々な分野の研究手法やシステムを搭載するプラットフォームの構築と、それを支える研究者の組織化。具体的には学際的、また横幹的な研究者グループの組織化。
6．電子民主主語による社会の構築 （第3．8節）	電子的参加の制度設計への合意形成のためのプラットフォームおよび電子民主主義への政策形成のためのプラットフォーム構築。	理工学，心理学，社会学，経済学，政治学，医学，言語学	異分野との連携の必要性（各分野の要素技術や知見の統合による問題形成と解決），心理学的知見と社会学的知見の統合が必要。	個人，研究者，大学，学会，国の各レベルでのインセンティブ，行動，組織・体制，価値観を考慮し，連携を推進する。またプラットフォーム構築のための方法論，推進のためのネットワーク化戦略を考える。
7．ヒューマンマシン協働によるディペンダブルな安全・安心の社会の構築 （第3．9節）	高信頼度な人間・製品技術における安全安心のためのプラットフォーム	信頼性工学，安全性工学，認知心理学，経済学，社会情報学，法学，シミュレーション技術，学習工学，センシング技術，保全技術	ユーザや製品使用環境の多様化，不適当なメンテナンス等に起因するトラブルに対する新たな予測技術と人間行動予測を伴う製品安全確保のための体系化が必要。	開発技術に加えてユーザ行動や社会影響を同時に総合分析できる人材の育成．人間適応型技術を実現するための複数技術を有する技術者，あるいは技術者集団の育成．安全情報共有化の仕組みの導入。
8．ロボティクス基盤高信頼社会の構築（第3．10節）	情報ロボティクス，人間科学，社会科学の3つの横軸と，減災・レスキュー，人間・社会へのサービス，人間能力の拡大の3つと縦軸からなるマトリックス上に新しい学問領域が創出される。	情報ロボティクス(IRT)，人間科学 (HS)，社会科学(SS)	ロボットの社会基盤としての位置づけを明確にするために，安全社会の確立，安心の創成，人間能力の拡大を実現するために3つの学術分野の統合化する必要がある。	フィールドロボットの構築による安全社会の創成、頼れるロボットの研究開発による安心の創成、ロボット技術の活用による人間能力の拡大を評価とする。
9．生産システムにおける知の統合（第3．11節）	設計，生産，流通，保守管理，破棄などのすべてのツール群，設計データや数式モデルの共有化が生産システムにおけるプラットフォームである。	言語，経験，メカニズム，ソフトウエアなどの数式化，モデル化，オープン化，知の公有化。	消費者の多様化とそれに応える21世紀型生産システム．販売よりも維持管理に重点をおいた物づくりから物育てへの移行	Reduce，Reduction，Recycleの社会と個人の幸せ意識に応じる一人一人の個性に対応したきめ細かい施策が必要。統一的な方向性というよりは個々の個性の集まりによる競争力確立。
10．計算機シミュレーションによる材料開発・創薬のための知の統合 （第3．12節）	基盤技術は大規模高速計算機システムであり，要素技術DBのレイヤーと，知識・数値・文献・プログラムなどのDBのレイヤーからなる統合プラットフォームであり，材料設計だけでなく，創薬などにも共通に活用できる。	大規模高速計算法（要素技術DB），分権DB・数値DB，知識DB・ノウハウDB・製品開発プラットフォームなどからなる。	膨大な試行錯誤の実験に代わり，大規模高速計算技術の驚異的な発展により，材料設計や創薬設計を統合化シミュレーションにより実現する。	古典論、相対論、量子論に加え、計算機科学の知識の獲得を実現する学際計算科学の確立

３．１４　おわりに

人間、社会、人工物、環境などが複雑に絡む包括的で社会的な課題を解決するためには、細分化された学術分野の統合が不可欠であるという認識のもとで、本章では、知の統合プラットフォームのメカニズムと役割について検討し、その基盤の上に創出される人文社会科学分野と理工学分野とを統合した新しい学術分野や技術分野のアカデミック・ロードマップを提示した。知の統合プラットフォームは、細分化した知の寄せ集めではなく、一段高い論理レベルでの広い科学技術の連携と集積を必要とする。人間と社会が複雑に関連する諸課題の解決のためには、分野を横断した規範が理念として存在しなくてはならず、そのためには知の統合の技術が各分野を横に貫く共通の枠組みとして、具体的に利用可能な共通ツールとして、プラットフォームを実体的に整備していく必要がある。

プラットフォーム上には、理工系と人文社会系を基盤とした統合により創生される学術分野や技術分野が論理性をもって体系化され、与えられた課題の枠組みを明確にし定式化することにより、プラットフォーム上の論理体系により実装プロセスを通して課題解決への対応策を与えることができる。様々な課題をプラットフォーム上に定式化しモデリングする普遍化と、アルゴリズムにより得られた課題への対応策の実装という特殊化との二つのプロセスによって、知の統合プラットフォームが共通性をもって機能している。

本章では、以上のような役割をもつ統合プラットフォーム上で構築される理論体系や技術体系を基盤として解決できると思われる諸問題（シーズやニーズ）をいくつか取り上げることにより、2050 年をめどとしたこれらのアカデミック・ロードマップについて検討した結果を提示した。

まず、人文社会系と理工系の大きな学問分野の枠を越えた相互理解の社会をどのように構築していくかという最も基本的な課題について考察した。個別分野の専門家により発見される新たな課題（シーズ）は、始めは孤立したものであっても、他の分野からは別の側面としての新たな知見が得られることが多い。しかし各分野の用語や定式化の方法が異なることから、異分野間で相互に議論することを困難にしていた。統合プラットフォームでは、一つの課題に対して多面的な見方を可能にし、分野横断的の解釈を可能にするための問題の定式化表現、モデリング技術や表現法、基礎的な数理的なツールなどを共通基盤としてもち、相互にコミュニケーションが可能な場としてのプラットフォームの役割の重要性を述べている。さらに、もう一つの重要な機能として、プラットフォーム上では、各分野の専門家も非専門家（生活者を含む）も、得られた統合知が共有され、議論される場として機能しなければならない。これが知の統合プラットフォームのさらに重要な役割であり、文理の枠を超えた相互理解型社会の構築に向けたアカデミック・ロードマップを提示した。

リスクはその現象や対象が極めて広範囲であり、リスク研究は横断的な側面をもつため、あらゆるリスク対象に対しての専門家は存在しないといえる。それだけに、前述したように、専門家・非専門家・異分野間のリスクコミュニケーションの場としての知識の交換と流通を各レイヤーで機能させ、さらに社会的要請や合意を得るに必要となるリスクガバナンスのための総合情報基盤の構築が不可欠となる。さらに、このような背景のもとで、リスクの現象や対象に強く依存しない普遍性のある知の統合プラットフォーム上に新しい学

術分野をいかに構築していくかという課題についても検討した。プラットフォーム上で、実社会からの価値選択 → 要求価値の工学モデルへの変換 → モデル上での最適化 → 最適化された価値の実社会への注入、というプロセスとデータベースを支援する様々な学術分野を有機的に連携し統合化することにより、新しい情報循環設計科学の基盤を構築し、さらに環境科学や金融科学との統合化により、普遍性の高い一般定量的リスク科学の創生を予測している。こうした基盤からは、経営学との連携統合により経営設計科学の創生も期待できる。このように知の統合プラットフォームにより、様々な理工系と人文社会系とを基盤とした新しい統合知の学術分野を生み出す役割を具体的に明らかにし、そのアカデミック・ロードマップを提示した。

リスク研究にも大きな貢献している統計科学や数理科学は、学術領域そのものが横断的科学技術分野であり、不特定多数への大量生産からオンデマンド・オーダーメイドのような個に焦点がシフトしつつある中で、ベイズ法に基づく大規模な社会現象のモデリングや予測が重要な役割をもつ。人文社会系、自然科学系などを基盤として、データサイエンスとしてモデリング・知識発見、システム推定・予測、信頼性評価・リスク管理などの知の統合により、対象に強く依存しない汎用性・適応性をもつ大規模複雑システム推測プラットフォーム構築の可能性とその課題解決のアカデミック・ロードマップを示した。

2050 年の温室ガス排出量半減に向けた低炭素社会の実現は、地域的、時間的なスケールでのコンフリクトの中で達成することが目標とされている。このためには、環境科学、環境技術、理工学系、人文社会系、国際関係論などを共通基盤とした学術的方法論の創生が不可欠であり、これをプラットフォームとして、各国や地域における低炭素社会実現の課題に向けた監視・予測システム、技術評価システム、社会評価システムを共通性をもって実体的に機能させることが重要であることを明らかにした。一方、高齢者社会の到来や地球環境の悪化などの社会的課題には利害関係者間の意見や方策を民主的に集約し統合する必要がある。コンフリクトやジレンマの存在下での納得の原理に基づく合意形成や政策形成のためのプラットフォーム上では､理工学系および様々な人文社会科学系を基盤として、集団意思決定支援、情報・知識コモンズ整備、集合知能のモデル化、集合的問題解決などの一般的な方法論が体系化され、個人、研究者、学会、国レベルでの参加、コミュニケーション、相互理解の場として機能する必要がある。

次に、ヒューマン・マシン協働の体系化をプラットフォームとしたディペンダブルな安全・安心社会の構築について検討した。プラットフォーム構築には、理工系の様々な技術や認知心理学、社会学などの人文社会系などの統合が必要であり、この共通性をもったプラットフォーム上では､様々なヒューマン･マシン協働に関わる課題の解決が可能となる。さらに、ロボティクスを基盤とする高信頼性社会に構築に向けた社会科学と人間科学と情報ロボティクスの統合したプラットフォームについて検討し、ロボット自体のシステム統合化だけでなく、安全社会の確立、安心の創生、人間能力の拡大を目標とした 3×3 のマトリックス型のプラットフォーム上に学術研究分野を創出し、さらにアカデミック・ロードマップを提示した。

消費者の多様化とそれに応える 21 世紀型の生産システム、販売よりも維持管理に重点をおいたものづくりからもの育てへの移行を背景に、設計、生産、流通、保守管理、廃棄などすべてのツール群、設計データ、数式モデル、経験知識モデルなどを、メーカ、ユー

ザ、企業、大学、個人などがオープンに共有できる場が知の統合プラットフォームとして構築されると、生産やサービスが大量生産から個人の個性に合わせたきめ細かな生産へシフトすることが予想される。もう一つのものづくりのプラットフォームとして、その上で機能大規模高速計算機システムを基盤として、要素技術 DB、知識・数値・文献などの DB を統合化することにより、要求物性を満たす材料設計や創薬を行う役割をもつ。材料開発や創薬の計算機シミュレーションの最終的な目標として、材料では、加工、利用、廃棄までのプロセス、創薬では症状を改善する分子の発見・合成、副作用や毒性、代謝や体外への排出までのプロセスをモデルに含み、循環型社会に向けた要素技術開発であり、広範囲な知の統合を必要としている。

本章で取り上げた知の統合を必要とする目標（ターゲット）に向けて、いずれも理工系と人文社会系を基盤とした新しい学術分野あるいは技術分野の普遍性をもった体系をプラットフォーム上に創生し、与えられた様々な課題に対応する役割をもつこと、そしてそのプラットフォームの役割として、異分野の人々、専門家、非専門家が、多面的な問題設定、相互理解やコミュニケーションが可能な共通手段、などが共有されていることが重要であること、さらに知のプラットフォームで文理横断を実践する人材の育成、知の統合により新しい学術創出を推進するための科学技術政策のあり方などについても検討した。知の統合を必要とする社会的な課題には今後ますます直面すると思われる。文理の壁を越えた相互交流のプラットフォームを早期に構築できるデザインが望まれる。

参考文献

- Ansell, J. and F. Wharton, eds.：*Risk: Analysis, Assessment and Management*, Wiley, 1992.
- Bainbridge, L.：Ironies of automation, *Automatica*, Vol. 19, No. 6, pp. 775–779, 1983.
- Darton, M., B. Sturmfels and S. Sullivant：*Lectures on Algebraic Statistics*, Birkhauser, 2009.
- Fisher, A. R.：*Design of Experiments*, Oliver Boyd, 1935.
- Habermas, J.：*Technik und Wissenschaft als Ideologie*, 1968 (長谷川宏 訳：イデオロギーとしての技術と科学, 紀伊國屋書店, 1970).
- Imoto, S., T. Goto and S. Miyano: Estimation of genetic networks and functional structures between genes by using Bayesian network and nonparametric regression, *Pacific Symposium on Biocomputing*, Vol. 7, pp. 175–186, 2002.
- Kammen M. D. and D. M. Hassenzahl: *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*, Princeton University Press, 1999.
- Nakamura, K, T. Higuchi and N. Hirose: Sequential data assimilation: information fusion of a numerical simulation and large scale observation data, *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 12, pp. 608–626, 2006.
- Pearson, K.：*The Grammar of Science*, Walter Scott, 1892.
- Pistone, G., E. Riccomagno and H. P. Wynn: *Algebraic Statistics*, Chapman and Hall, 2001.
- Spearman, C.：“General intelligence,” objectively determined and measured, *American Journal of Psychology*, Vol. 15, pp. 201–293, 1904.
- Tukey, W. J.: The future of data analysis, *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 33, No. 1, pp. 1－67, 1962.
- Tukey, W. J.: Some thoughts on clinical trials, especially problems of multiplicity, *Science*, Vol. 198, Issue 4318, pp. 679–684, 1977.
- Tsubaki, H., K. Nishina and S. Yamada, eds.：*The Grammar of Technology Development*, Springer, 2008.
- Ueno, G., T. Higuchi, T. Kagimoto and N. Hirose: Application of the ensemble Kalman filter and smoother to a coupled atmosphere-ocean model, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 3, pp. 5–8, 2007.
- Wald, A.：*Statistical Decision Function*, John Wiley and Sons, 1950.
- 遠藤薫：日本文化における人工物観－時計技術はなぜ人形浄瑠璃を生んだか－, 横幹, Vol. 1, No. 1, pp. 43–50, 2007.
- 遠藤薫：ネット・メディアと＜公共圏＞, 日本社会情報学会学会誌, Vol. 17, No.2, pp. 5–12, 2005.
- 横断型基幹科学技術研究団体連合：学会横断型アカデミック・ロードマップ報告書,

2008 年.
- 太田敏澄，他：社会情報システム学・序説，富士通経営研修所，1966.
- 太田敏澄：自己生成パラダイムと社会情報学，日本社会情報学会学会誌，Vol. 18, No. 1, pp. 5–14, 2006.
- 環境省：21 世紀環境立国戦略, 2007.
- 北川源四郎: 定量的リスク科学, 文部科学省新学術創生領域提案書, 2008.
- 国立環境研究所: 長期研究戦略タスクフォース報告書, 2007.
- 国立環境研究所: 2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討報告書，2008.
- 須藤修，後藤玲子，田中秀幸：情報化と社会制度の構築に関する研究，情報処理，Vol. 48, No. 6, pp. 653–661, 2007.
- 総務省：「u-Japan 政策」概要, 2005 年 6 月.
- 田中健次, 伊藤 誠: 信頼性・安全性確保のためのユーザと企業の情報共有と活用, 日本品質管理学会誌「品質」，Vol. 38, No. 4, pp. 41–47, 2008.
- 谷口武俊：リスク意思決定論，大阪大学出版会，2008.
- 寺野隆雄：エージェント・ベース・モデリングの技術と応用，日本社会情報学会学会誌，Vol. 19, No. 2, pp. 37–44, 2007.
- 東京大学社会情報研究所編，濱田純一他著：社会情報学 I，東京大学出版会, 1999.
- 富山慶典：電子投票システムの現状と課題－ネットワーク民主制の構築を目指して－，第四回社会情報システム学シンポジウム講演論文集, pp. 13–22, 1998.
- 中谷内一也：リスクのモノサシ：安全・安心生活はありうるか，日本放送出版協会，2006.
- 中西準子：環境リスク学，日本評論社，2004.
- 中村雄二郎：共通感覚論，岩波書店，1979.
- 日本学術会議：提言「知の統合－社会のための科学に向けて－」, 2007 年 3 月.
- 日本学術会議：記録「知の統合の具体的方策－工学基盤からの視点－」，2008 年 8 月.
- ミニ特集：横断型人材育成，横幹，Vol. 3, No. 1, 2009.
- 村上陽一郎: 科学・技術と社会－文・理を越える新しい科学・技術論，光村教育図書，1999.
- 樋口(監修)：統計数理は隠された未来をあらわにする －ベイジアンモデリングによる実世界イノベーション，東京電機大学出版局，2007.
- 鷲尾隆, 樋口知之, 井元清哉, 玉田嘉紀, 佐藤健, 元田浩: グラフマイニングとその統計的モデリングへの応用，統計数理, Vol. 54, No. 2, pp. 315–332, 2006.